

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт - филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
Г. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
«_____» _____ 201 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код - наименование направления

Динамические процессы многофазного асинхронного двигателя
тема
в пуско-тормозных режимах

Руководитель _____ профессор, доктор технических наук В.П. Кочетков
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ С.Н. Ронских
подпись, дата инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____ А.В. Коловский
подпись, дата инициалы, фамилия

Абакан 2017

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО
«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г. Н. Чистяков

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

« » 20 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Динамические процессы многофазного асинхронного двигателя в пуско-тормозных режимах» содержит 55 страниц текстового документа, 28 рисунков, 1 таблица, 27 использованных источников, 3 листа графического материала.

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ФАЗНЫЙ РОТОР, ПРИНЦИП РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПОДКЛЮЧЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.

Объект исследований - трехфазный асинхронный двигатель мощностью 55 кВт и 4 кВт.

Предмет исследований - динамические процессы трехфазного асинхронного двигателя в пуско-тормозных режимах.

Методы исследования - моделирование асинхронного короткозамкнутого трехфазного двигателя в собственной системе координат.

Научная новизна - применение методики решения дифференциальных уравнений в векторной форме, разработанной на кафедре электроэнергетики ХТИ – филиала СФУ.

Цель работы заключается в сравнение протекания переходного процесса в 55 кВт трехфазном асинхронном короткозамкнутом двигателе с переходным процессом в 4 кВт трехфазном асинхронном короткозамкнутом двигателе.

Область применения - работа может быть предложена компаниям или институтам, специализирующимся на разработке и улучшении асинхронных двигателей, как более простой и более точный метод получения переходных процессов и динамических механических характеристик.

Задачи выпускной квалификационной работы:

- показать методику решения дифференциальных уравнений в векторной форме, разработанную на кафедре электроэнергетики ХТИ – филиала СФУ;
- показать динамические механические характеристики и протекание переходных процессов в пуско-тормозных режимах трехфазного асинхронного двигателя с мощностями 55 кВт и 4 кВт.

В течение проработки проекта были получены следующие результаты:

- выполнено моделирование трехфазного асинхронного двигателя в пакете SIMULINK системы MATLAB.
- по модели трехфазного асинхронного двигателя были получены динамические механические характеристики и переходные процессы в пуско-тормозных режимах на двигатели мощностью 55 кВт и 4 кВт.

ESSAY

The final qualifying work on the topic "Dynamic processes of a multiphase asynchronous motor in start-braking modes" contains 55 pages of a text document, 28 figures, 1 table, 27 used sources, 3 sheets of graphic material.

ASYNCHRONOUS ENGINE, PHASE ROTOR, THE PRINCIPLE OF OPERATION OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE, CONNECTION OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE, MANAGEMENT ASYNCHRONOUS ENGINE, MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ENGINE IN THE TWO-PHASE SYSTEM OF THE COORDINATE, MODELING OF THE THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ENGINE IN THE THREE-PHASE SYSTEM OF THE COORDINATE, TRANSIENT PROCESSES OF THE THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ENGINE, DYNAMIC MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE.

The object of research - three-phase asynchronous motor with a power of 55 kW and 4 kW.

The subject of research - dynamic processes of the three-phase asynchronous motor in the starting and braking modes.

Research methods - modeling of an asynchronous short-circuited three-phase motor in its own coordinate system.

Scientific novelty is the application of the technique of solving differential equations in vector form developed at the department of electric power engineering of the HTI - branch of SFU.

The aim of the work is to compare the flow of a transient process in a 55 kW three-phase asynchronous short-circuited motor with a transient in a 4 kW three-phase asynchronous short-circuited motor.

Scope - the work can be offered to companies or institutions specializing in the development and improvement of asynchronous motors, as a simpler and more accurate method for obtaining transients and dynamic mechanical characteristics.

The tasks of the final qualifying work:

- show the methodology for solving differential equations in vector form developed at the department of electric power engineering of the HTI - SFU branch;
- to show the dynamic mechanical characteristics and the course of transient processes in the starting and braking modes of a three-phase asynchronous motor with capacities of 55 kW and 4 kW.

During the development of the project, the following results were obtained:

- simulation of a three-phase asynchronous motor in the SIMULINK package of the MATLAB system.
- based on the model of a three-phase asynchronous motor, the dynamic mechanical characteristics and transient processes in the starting and braking modes for 55 kW and 4 kW engines were obtained.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Актуальность и устройство асинхронных электродвигателей с фазным ротором	11
1.1 Устройство асинхронных электродвигателей с фазным ротором	11
1.2 Принцип работы. Вращающееся магнитное поле	13
1.3 Преобразование энергии	19
1.4 Подключение асинхронного двигателя. Звезда и треугольник	20
1.5 Управление асинхронным двигателем, прямое подключение к сети питания	23
1.6 Частотное управление асинхронным электродвигателем	24
2 Математическое описание электропривода переменного тока	27
2.1 Математическое описание трехфазного асинхронного двигателя	27
2.2 Введение обобщённого пространственного комплекса	29
2.3 Описание асинхронной машины с короткозамкнутым ротором	33
3 Моделирование электромеханических систем в пакете SIMULINK системы MATLAB	38
3.1 Краткие сведения о пакете динамического моделирования Simulink системы MATLAB	38
3.2 Полезные советы при моделировании в Simulink системы MATLAB	46
4 Моделирование асинхронного короткозамкнутого трехфазного двигателя в собственной системе координат	49
Заключение	56
Список использованных источников	57

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронная машина это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

В некоторых странах к асинхронным машинам причисляют также коллекторные машины. Второе название асинхронных машин, индукционные машины, это объясняется тем, что ток в обмотке ротора индуцируется вращающимся полем статора. Асинхронные машины сегодня составляют большую часть электрических машин, применяясь главным образом в качестве электродвигателей и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую, в подавляющем большинстве это асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Достоинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

1. Простота изготовления.
2. Относительная дешевизна.
3. Высокая надёжность в эксплуатации.
4. Невысокие эксплуатационные затраты.
5. Возможность включения в сеть без каких-либо преобразователей (для нагрузок, не нуждающихся в регулировке скорости).

Все вышеперечисленные достоинства являются следствием отсутствия механических коммутаторов в цепи ротора и привели к тому, что большинство электродвигателей, используемых в промышленности - это асинхронные машины, в исполнении асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Недостатки асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

1. Небольшой пусковой момент.
2. Значительный пусковой ток.
3. Низкий коэффициент мощности.
4. Сложность регулирования скорости с необходимой точностью.
5. Максимальная скорость двигателя ограничена частотой сети (для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, питаемых непосредственно от трёхфазной сети 50 Гц - это 3000 об/мин).
6. Сильная зависимость (квадратичная) электромагнитного момента от напряжения питающей сети (при изменении напряжения в 2 раза вращающий момент изменяется в 4 раза; у ДПТ вращающий момент зависит от напряжения питания якоря в первой степени, что более благоприятно).

Самый совершенный подход к устранению вышеуказанных недостатков - это питание двигателя через частотный преобразователь, в котором управление производится по сложным алгоритмам.

Большой вклад в создание асинхронных двигателей внесли Галилео Феррарис и Никола Тесла. В 1888 году Галилео опубликовал свои исследования в статье для Королевской академии наук в Турине (в том же году Никола

Тесла получил патент США), в которой изложил теоретические основы асинхронного двигателя. Заслуга Феррариса в том, что, сделав ошибочный вывод о небольшом КПД асинхронного двигателя и о нецелесообразности применения систем переменного тока, он привлек внимание многих инженеров к проблеме совершенствования асинхронных машин. Статья Феррариса, опубликованная в журнале «Атти ди Турино», была перепечатана английским журналом и в июле 1888 года попала на глаза выпускнику Дармштадтского высшего технического училища, выходцу из Российской Империи Михаилу Осиповичу Доливо-Добровольскому. Уже в 1889 году Доливо-Добровольский получил патент на трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа «беличье колесо» (германский патент № 51083 от 8 марта 1889 года под названием «Anker für Wechselstrommotoren»), а в 1890-м - патенты в Англии № 20425 и Германии № 75361 на фазный ротор с кольцами и пусковыми устройствами. Это изобретение открыло эру массового промышленного применения электрических машин. В настоящее время асинхронный двигатель является самым распространенным электродвигателем.[1]

Асинхронная машина имеет статор и ротор, разделённые воздушным зазором. Активными частями являются обмотки и магнитопровод (сердечник); все остальные части - конструктивные, обеспечивающие необходимую прочность, жёсткость, охлаждение, возможность вращения и т. п.

Обмотка статора представляет собой трёхфазную (многофазную) обмотку, проводники которой равномерно распределены по окружности статора и пофазно уложены в пазах с угловым расстоянием 120. Фазы обмотки статора соединяют по стандартным схемам «треугольник» или «звезда» и подключают к сети трёхфазного тока. Магнитопровод статора перемagnичивается в процессе изменения тока в обмотке статора, поэтому его набирают из пластин электротехнической стали для обеспечения минимальных магнитных потерь. Основным методом сборки магнитопровода в пакет является шихтовка.

По конструкции ротора асинхронные машины подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Оба типа имеют одинаковую конструкцию статора и отличаются лишь исполнением обмотки ротора. Магнитопровод ротора выполняется аналогично магнитопроводу статора - из пластин электротехнической стали.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Короткозамкнутая обмотка ротора, часто называемая «беличье колесо» из-за внешней схожести конструкции, состоит из алюминиевых (реже медных, латунных) стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами. Стержни этой обмотки вставляют в пазы сердечника ротора. Сердечники ротора и статора имеют зубчатую структуру. В машинах малой и средней мощности обмотку обычно изготавливают путём заливки расплавленного алюминиевого сплава в пазы сердечника ротора. Вместе со стержнями «беличьего

колеса» отливают короткозамыкающие кольца и торцевые лопасти, осуществляющие вентиляцию машины. В машинах большой мощности «беличье колесо» выполняют из медных стержней, концы которых соединяют с короткозамыкающими кольцами при помощи сварки.

Часто пазы ротора или статора делают скошенными для уменьшения высших гармонических ЭДС, вызванных пульсациями магнитного потока из-за наличия зубцов, магнитное сопротивление которых существенно ниже магнитного сопротивления обмотки, а также для снижения шума.

Для улучшения пусковых характеристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, а именно, увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока, на роторе ранее применялась так называемая «двойная беличья клетка» из стержней с разными удельными проводимостями, позже стали применять роторы со специальной формой паза (глубокопазные роторы). При этом внешняя от оси вращения часть паза ротора имеет меньшее сечение, чем внутренняя. Это позволяет использовать эффект вытеснения тока, за счет которого увеличивается активное сопротивление обмотки ротора при больших скольжениях (в частности, при пуске).[1]

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при прямом пуске (без регулирования) имеют небольшой пусковой момент и значительный пусковой ток, что является существенным их недостатком. Поэтому их применяют в тех электрических приводах, где не требуются большие пусковые моменты. С развитием силовой полупроводниковой техники получают распространение частотные преобразователи, которые позволяют плавно наращивать частоту питающего двигателя тока по мере пуска, а значит достигать большого пускового момента. Из достоинств следует отметить лёгкость в изготовлении, и отсутствие электрического контакта с динамической частью машины, что гарантирует долговечность и снижает затраты на обслуживание. При специальной конструкции ротора, когда вращается в воздушном зазоре только полый цилиндр из алюминия, можно достичь малой инерционности двигателя.

Многоскоростные двигатели это разновидностью асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, позволяющей ступенчато регулировать скорость, регулирование скорости производится изменением числа пар полюсов в статоре, для чего были разработаны специальные виды обмоток.

Именно асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором из-за своих вышеперечисленных достоинств являются основным видом двигателей в промышленном электроприводе, применение остальных видов двигателей не значительно и носит узкоспециальный характер.

Асинхронный двигатель с массивным ротором

Существует разновидность асинхронных машин с массивным ротором. Такой ротор изготавливают полностью из ферромагнитного материала, то есть фактически это стальной цилиндр. Ферромагнитный ротор одновременно выполняет роль как магнитопровода, так и проводника (вместо обмотки).

Вращающееся магнитное поле индуцирует в роторе вихревые токи, которые взаимодействуя с магнитным потоком статора создают вращающий момент.

Достоинства:

1. Простота изготовления, дешевизна
2. Высокая механическая прочность (важно для высокоскоростных машин)
3. Высокий пусковой момент

Недостатки:

1. Большие потери энергии в роторе
2. Особенности:
3. Имеют пологую механическую характеристику
4. Ротор значительно нагревается даже при небольших нагрузках.

Существуют разные способы улучшения массивных роторов: припайвание медных колец по торцам, покрытие ротора слоем меди.

Отдельно можно поставить машины с полым ротором. Это может быть полый цилиндр из ферромагнитного или просто из проводящего материала.

Асинхронный двигатель с фазным ротором

Эта разновидность электродвигателя допускает плавную регулировку скорости в широких пределах. Фазный ротор имеет трёхфазную или многофазную обмотку, обычно соединённую по схеме «звезда» и выведенную на контактные кольца, вращающиеся вместе с валом машины. С помощью графитовых или металлографитовых щёток, скользящих по этим кольцам, в цепь обмотки ротора подключают внешнюю электрическую цепь, которая позволяет регулировать скорость ротора:

- включают пускорегулирующий реостат, выполняющий роль добавочного активного сопротивления, одинакового для каждой фазы. Снижая пусковой ток, добиваются увеличения пускового момента до максимального значения (в первый момент времени). Такие двигатели применяются для привода механизмов, которые пускают в ход при большой нагрузке или требующих плавного регулирования скорости. Такое регулирование скорости по характеристикам аналогично реостатному регулированию скорости в ДПТ изменением сопротивления в цепи якоря.
- включают индуктивности (дрессели) в каждую фазу ротора. Сопротивление дросселей пропорционально частоте протекающего тока, а, как известно, в роторе в первый момент пуска частота токов скольжения наибольшая. По мере раскрутки ротора частота индуцированных токов снижается, и вместе с ней снижается сопротивление дросселя. Индуктивное сопротивление в цепи фазного ротора позволяет автоматизировать процедуру запуска двигателя, а при необходимости - «подхватить» двигатель, у которого упали обороты из-за перегрузки. Индуктивность держит токи ротора на постоянном уровне.

- включают источник постоянного тока, получая таким образом синхронную машину.
- включают питание от инвертора, что позволяет управлять скоростью и электромагнитными моментами двигателя. Это особый режим работы (машина двойного питания). Возможно включение напряжения сети без инвертора, с фазировкой, противоположной той, которой запитан статор.

Двигатель Шраге-Рихтера

Трёхфазный коллекторный асинхронный двигатель с питанием со стороны ротора.

Обращенный (питание с ротора) асинхронный двигатель, позволяющий плавно регулировать скорость от минимальной (диапазон определяется обмоточными данными добавочной обмотки, используемой для получения добавочной ЭДС, вводимой с частотой скольжения во вторичную цепь машины) до максимальной, лежащей обычно выше скорости синхронизма. Физически производится изменением раствора двойного комплекта щёток на каждую «фазу» вторичной цепи двигателя. Таким образом, переставляя при помощи механического устройства щёточные траверсы являлось возможным весьма экономично управлять скоростью асинхронного двигателя переменного тока. Идея управления в общем предельно проста и будет реализована впоследствии в так называемых асинхронно-вентильных каскадах, где в цепь фазного ротора включали тиристорный преобразователь, работавший инвертором или в выпрямительном режиме. Сущность идеи - во вторичную цепь асинхронного двигателя вводится добавочная ЭДС изменяемой амплитуды и фазы с частотой скольжения. Задачу согласования частоты добавочной ЭДС с частотой скольжения ротора выполняет коллектор. Если добавочная ЭДС противоположена основной, производится вывод мощности из вторичной цепи двигателя с соответствующим уменьшением скорости машины, ограничение скорости вниз диктуется только условиями охлаждения обмоток. В точке синхронизма машины частота добавочной ЭДС равна нулю, то есть во вторичную цепь коллектором подаётся постоянный ток. В случае суммирования добавочной ЭДС с основной производится инвертирование добавочной мощности во вторичную цепь машины, и соответственно - разгон выше синхронной частоты вращения. Таким образом, результатом регулирования являлось семейство достаточно жестких характеристик с уменьшением критического момента при снижении скорости, а при разгоне выше синхронной скорости - с его пропорциональным увеличением.[1]

Особый интерес представляет собой работа машины с несимметричным раствором щеточных траверс. В этом случае векторная диаграмма добавочной ЭДС двигателя получает так называемую тангенциальную составляющую, делающую возможным работу с ёмкостной реакцией на сеть.

Конструктивно двигатель представляет собой обращенную машину, где на роторе уложены две обмотки: питание с питанием с контактных колец

и обмотку, соединяемую посредством двух пар щеток на «фазу» со вторичной обмоткой статора. Фактически, эти две части вторичной обмотки в зависимости от положения щеточных траверс включаются то согласно друг другу, то встречно. Так осуществляется регулирование.

Наибольшее развитие такие двигатели получили в 30-е годы XX века. В Советском Союзе коллекторные машины переменного тока не получили заметного распространения и развития в силу повышенных требований к изготовлению коллекторно-щёточного узла и общей высокой стоимости. На территорию СССР они проникали в основном в составе приобретённого за границей оборудования и при первой возможности заменялись менее эффективными, но более дешевыми машинами постоянного тока или асинхронными двигателями с фазным ротором.

В настоящее время двигатель Шраге представляет интерес исключительно с точки зрения истории техники.

1 Актуальность и устройство асинхронных электродвигателей с фазным ротором

В настоящее время, на долю асинхронных двигателей приходится не менее восьмидесяти процентов всех электродвигателей, выпускаемых промышленностью. К ним относятся и трехфазные асинхронные двигатели.

Трехфазные асинхронные электродвигатели широко используются в устройствах автоматики и телемеханики, бытовых и медицинских приборах, устройствах звукозаписи и т.п.

Широкое распространение трехфазных асинхронных двигателей объясняется простотой их конструкции, надежностью в работе, хорошими эксплуатационными свойствами, невысокой стоимостью и простотой в обслуживании.

1.1 Устройство асинхронных электродвигателей с фазным ротором

Основными частями любого асинхронного двигателя является неподвижная часть - статор и вращающаяся часть, называемая ротором.

Статор трехфазного асинхронного двигателя состоит из шихтованного магнитопровода, запрессованного в литую станину. На внутренней поверхности магнитопровода имеются пазы для укладки проводников обмотки. Эти проводники являются сторонами многовитковых мягких катушек, образующих три фазы обмотки статора. Геометрические оси катушек сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120 градусов.[2]

Фазы обмотки можно соединить по схеме "звезда" или "треугольник" в зависимости от напряжения сети. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения 220/380 В, то при напряжении сети 380 В фазы соединяют "звездой". Если же напряжение сети 220 В, то обмотки соединяют в "треугольник". В обоих случаях фазное напряжение двигателя равно 220 В.[2]

Ротор трехфазного асинхронного двигателя представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали и насаженный на вал. В зависимости от типа обмотки роторы трехфазных асинхронных двигателей делятся на короткозамкнутые и фазные.

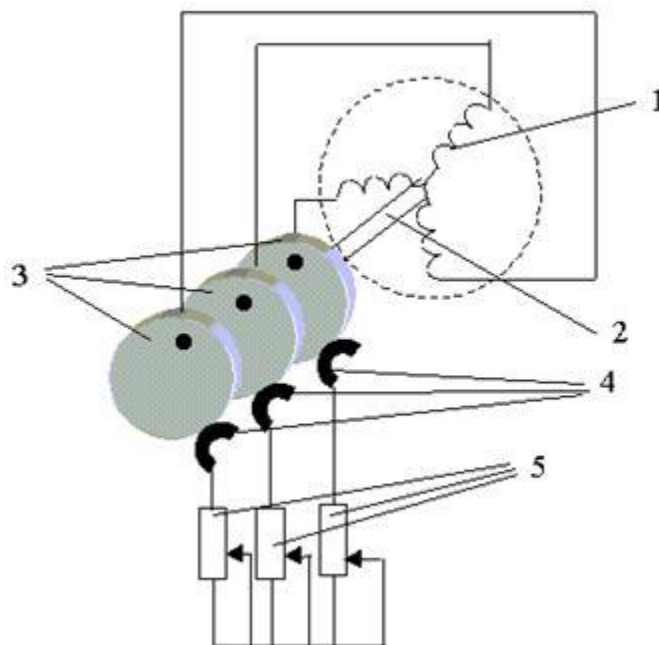


Рисунок 1.1 - Схема асинхронного электродвигателя с фазным ротором

В асинхронных электродвигателях большей мощности и специальных машинах малой мощности для улучшения пусковых и регулировочных свойств применяются фазные роторы. В этих случаях на роторе укладывается трехфазная обмотка с геометрическими осями фазных катушек (1), сдвинутыми в пространстве друг относительно друга на 120 градусов.

Фазы обмотки соединяются звездой и концы их присоединяются к трем контактными кольцам (3), насаженным на вал (2) и электрически изолированным как от вала, так и друг от друга. С помощью щеток (4), находящихся в скользящем контакте с кольцами (3), имеется возможность включать в цепи фазных обмоток регулировочные реостаты (5).

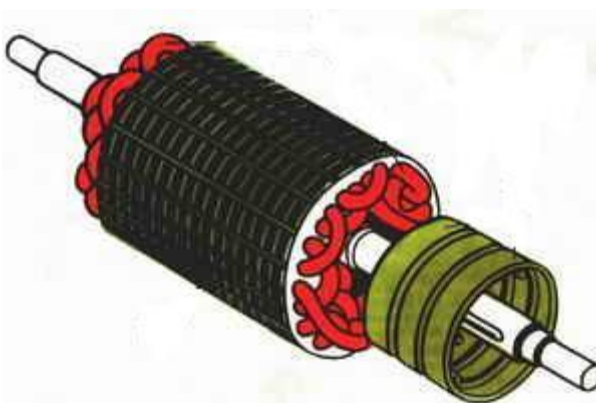


Рисунок 1.2 - Фазный ротор

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет лучшие пусковые и регулировочные свойства, однако ему присущи большие масса, размеры и стоимость, чем асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором.

1.2 Принцип работы. Вращающееся магнитное поле

Принцип действия трехфазного асинхронного электродвигателя основан на способности трехфазной обмотки при включении ее в сеть трехфазного тока создавать вращающееся магнитное поле.



Рисунок 1.3 - Вращающееся магнитное поле асинхронного электродвигателя

Частота вращения этого поля, или синхронная частота вращения прямо пропорциональна частоте переменного тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p трехфазной обмотки.

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \quad (1.1)$$

где n_1 - частота вращения магнитного поля статора, об/мин,

f_1 - частота переменного тока, Гц,

p - число пар полюсов

Чтобы понять феномен вращающегося магнитного поля лучше, рассмотрим упрощенную трехфазную обмотку с тремя витками. Ток текущий по проводнику создает магнитное поле вокруг него. На рисунке ниже показано поле создаваемое трехфазным переменным током в конкретный момент времени



Рисунок 1.4 - Магнитное поле прямого проводника с постоянным током

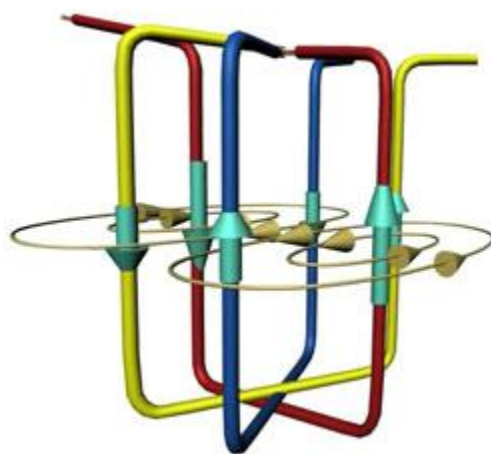
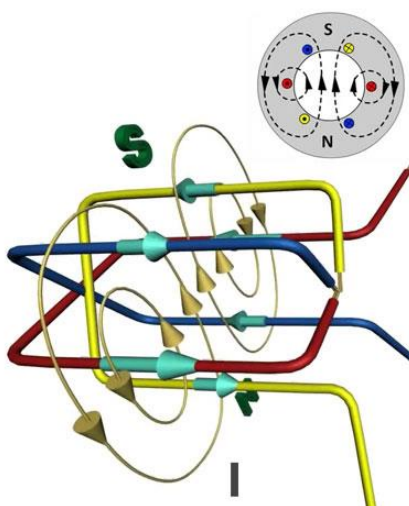


Рисунок 1.5 - Магнитное поле создаваемое обмоткой

Составляющие переменного тока будут изменяться со временем, в результате чего будет изменяться создаваемое ими магнитное поле. При этом результирующее магнитное поле трехфазной обмотки будет принимать разную ориентацию, сохраняя при этом одинаковую амплитуду.



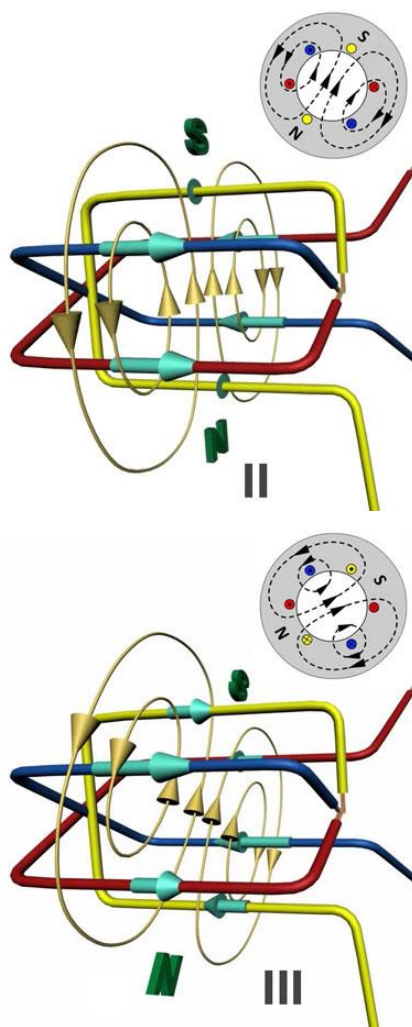


Рисунок 1.6 - Магнитное поле создаваемое трехфазным током в разный момент времени

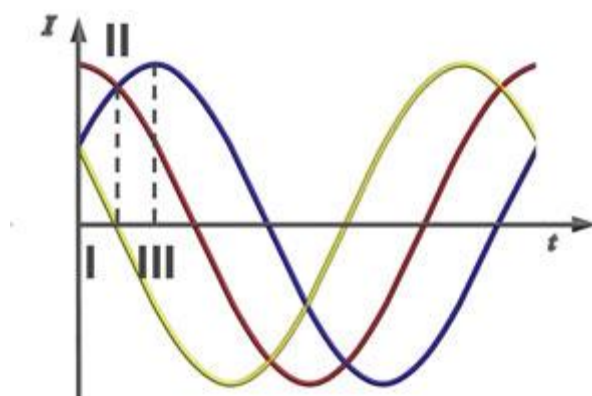


Рисунок 1.7 - Ток протекающий в витках электродвигателя (сдвиг 60°)

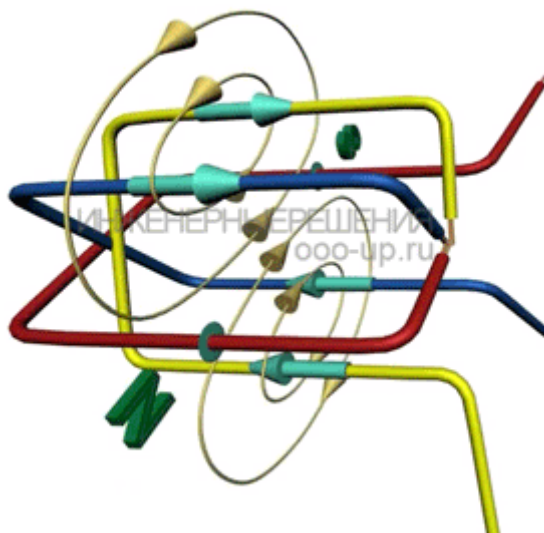


Рисунок 1.8 - Вращающееся магнитное поле

Теперь разместим замкнутый проводник внутри вращающегося магнитного поля. По закону электромагнитной индукции изменяющееся магнитное поле приведет к возникновению электродвижущей силы (ЭДС) в проводнике. В свою очередь ЭДС вызовет ток в проводнике. Таким образом, в магнитном поле будет находиться замкнутый проводник с током, на который согласно закону Ампера будет действовать сила, в результате чего контур начнет вращаться.

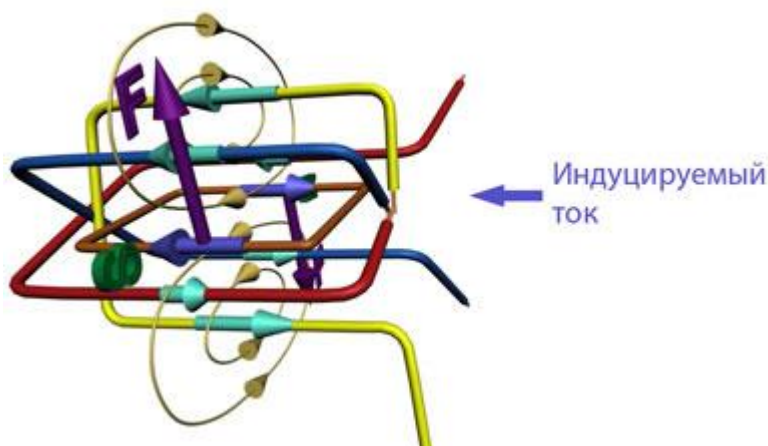


Рисунок 1.9 - Влияние вращающегося магнитного поля на замкнутый проводник с током

По этому принципу также работает асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Вместо рамки с током внутри асинхронного двигателя находится короткозамкнутый ротор по конструкции напоминающий беличье колесо. Короткозамкнутый ротор состоит из стержней накоротко замкнутых с торцов кольцами.



Рисунок 1.10 - Короткозамкнутый ротор "беличья клетка" наиболее широко используемый в асинхронных электродвигателях (показан без вала и сердечника)

Трехфазный переменный ток, проходя по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле. Таким образом, также как было описано ранее, в стержнях ротора будет индуцироваться ток, в результате чего ротор начнет вращаться. На рисунке ниже Вы можете заметить различие между индуцируемыми токами в стержнях. Это происходит из-за того что величина изменения магнитного поля отличается в разных парах стержней, из-за их разного расположения относительно поля. Изменение тока в стержнях будет изменяться со временем.

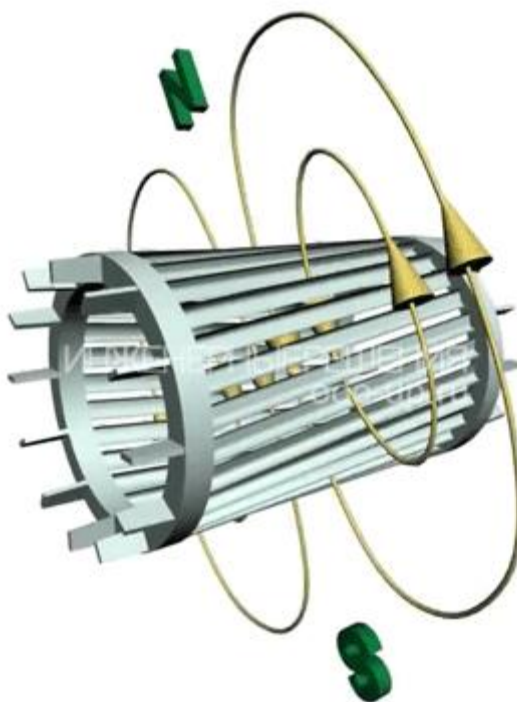


Рисунок 1.11 - Вращающееся магнитное поле пронизывающее короткозамкнутый ротор

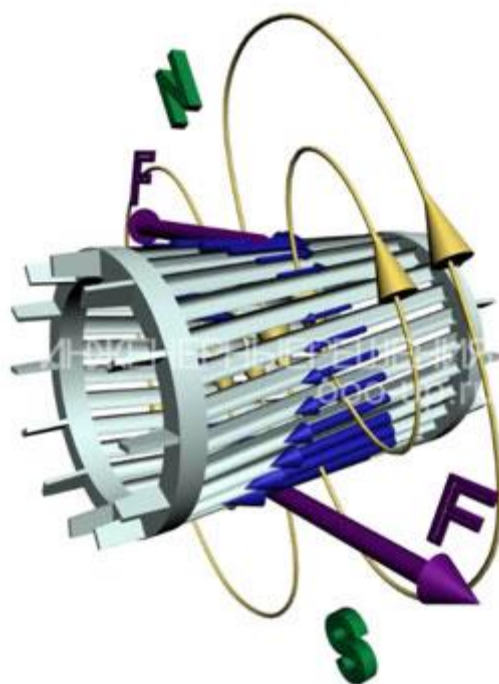


Рисунок 1.12 - Магнитный момент действующий на ротор

Вы также можете заметить, что стержни ротора наклонены относительно оси вращения. Это делается для того чтобы уменьшить высшие гармоники ЭДС и избавиться от пульсации момента. Если стержни были бы направлены вдоль оси вращения, то в них возникало бы пульсирующее магнитное поле из-за того, что магнитное сопротивление обмотки значительно выше магнитного сопротивления зубцов статора.

Скольжение асинхронного двигателя. Скорость вращения ротора

Отличительный признак асинхронного двигателя состоит в том, что частота вращения ротора n_2 меньше синхронной частоты вращения магнитного поля статора n_1 .

Объясняется это тем, что ЭДС в стержнях обмотки ротора индуцируется только при неравенстве частот вращения $n_2 < n_1$. Частота вращения поля статора относительно ротора определяется частотой скольжения $n_s = n_1 - n_2$. Отставание ротора от вращающегося поля статора характеризуется относительной величиной s , называемой скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

где s - скольжение асинхронного электродвигателя,

n_1 - частота вращения магнитного поля статора, об/мин,

n_2 - частота вращения ротора, об/мин,

Рассмотрим случай когда частота вращения ротора будет совпадать с частотой вращения магнитного поля статора. В таком случае относительное

магнитное поле ротора будет постоянным, таким образом в стержнях ротора не будет создаваться ЭДС, а следовательно и ток. Это значит что сила действующая на ротор будет равна нулю. Таким образом ротор будет замедляться. После чего на стержни ротора опять будет действовать переменное магнитное поле, таким образом будет расти индуцируемый ток и сила. В реальности же ротор асинхронного электродвигателя никогда не достигнет скорости вращения магнитного поля статора. Ротор будет вращаться с некоторой скоростью которая немного меньше синхронной скорости.

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в диапазоне от 0 до 1, т. е. 0-100%. Если $s \sim 0$, то это соответствует режиму холостого хода, когда ротор двигателя практически не испытывает противодействующего момента; если $s=1$ - режиму короткого замыкания, при котором ротор двигателя неподвижен ($n_2 = 0$). Скольжение зависит от механической нагрузки на валу двигателя и с ее ростом увеличивается.

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называется номинальным скольжением. Для асинхронных двигателей малой и средней мощности номинальное скольжение изменяется в пределах от 8% до 2%.

1.3 Преобразование энергии

Асинхронный двигатель преобразует электрическую энергию подаваемую на обмотки статора, в механическую (вращение вала ротора). Но входная и выходная мощность не равны друг другу так как во время преобразования происходят потери энергии: на трение, нагрев, вихревые токи и потери на гистерезисе. Это энергия рассеивается как тепло. Поэтому асинхронный электродвигатель имеет вентилятор для охлаждения.

Электрическая сеть трехфазного переменного тока получила наиболее широкое распространение среди электрических систем передачи энергии. Главным преимуществом трехфазной системы по сравнению с однофазной и двухфазной системами является ее экономичность. В трехфазной цепи энергия передается по трем проводам, а токи текущие в разных проводах сдвинуты относительно друг друга по фазе на 120° , при этом синусоидальные ЭДС на разных фазах имеют одинаковую частоту и амплитуду.

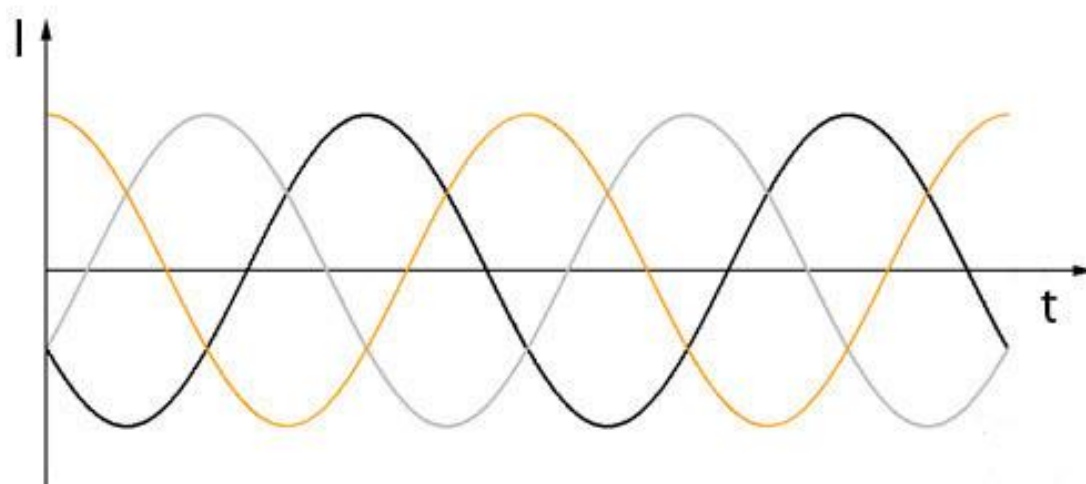


Рисунок 1.13 – Трехфазный ток (сдвиг фаз 120°)

1.4 Подключение асинхронного двигателя. Звезда и треугольник

Трехфазная обмотка статора электродвигателя соединяется по схеме "звезда" или "треугольник" в зависимости от напряжения питания сети. Концы трехфазной обмотки могут быть: соединены внутри электродвигателя (из двигателя выходит три провода), выведены наружу (выходит шесть проводов), выведены в распределительную коробку (в коробку выходит шесть проводов, из коробки три).

Фазное напряжение - разница потенциалов между началом и концом одной фазы. Другое определение: фазное напряжение это разница потенциалов между линейным проводом и нейтралью.

Таблица 1 - Линейное напряжение - разность потенциалов между двумя линейными проводами (между фазами).

Звезда	Треугольник	Обозначение
$U_L = \sqrt{3}U_\phi$	$U_L = U_\phi$	U_L, U_ϕ - линейное и фазовое напряжение, В,
$I_L = I_\phi$	$I_L = \sqrt{3}I_\phi$	I_L, I_ϕ - линейный и фазовый ток, А,
$S = 3S_\phi = \sqrt{3}I_L U_L$	$S = \sqrt{3}I_L U_L$	S - полная мощность, Вт
$P = \sqrt{3}I_L U_L \cos\varphi$	$P = \sqrt{3}I_L U_L \cos\varphi$	P - активная мощность, Вт

Если в нормальном режиме электродвигатель подключен по схеме "треугольник", то для уменьшения пусковых токов на время пуска его можно соединить по схеме звезда. При этом вместе с пусковым током уменьшится также пусковой момент.

Обозначения выводов электродвигателя

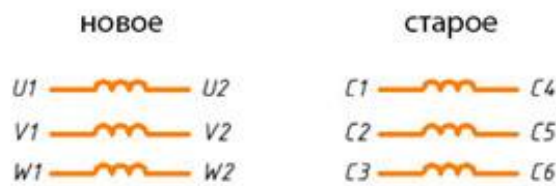


Схема подключения "звезда"

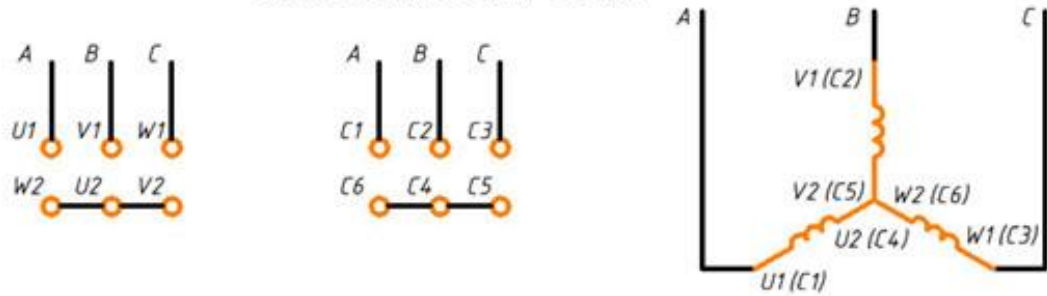


Схема подключения "треугольник"

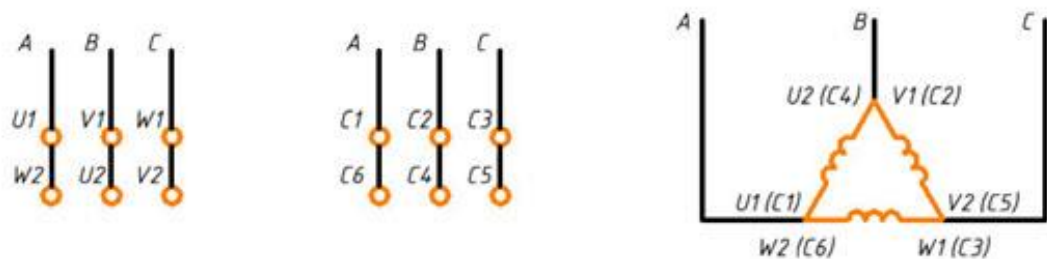


Рисунок 1.14 - Подключение электродвигателя по схеме звезда и треугольник

Трехфазные асинхронные электродвигатели могут быть подключены к однофазной сети с помощью фазосдвигающих элементов. При этом электродвигатель будет работать либо в режиме однофазного двигателя с пусковой обмоткой (рисунок а, б, г) либо в режиме конденсаторного двигателя с постоянно включенным рабочим конденсатором (рисунок в, д, е).

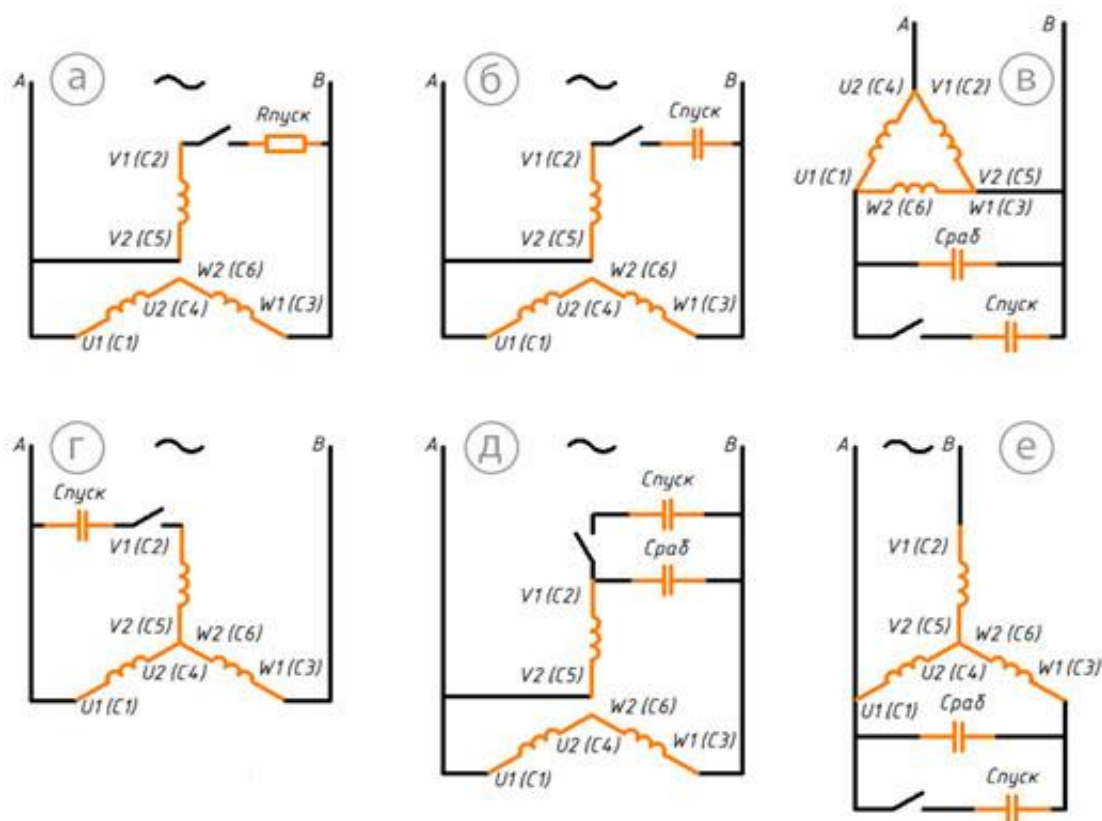


Рисунок 1.15 - Схемы подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к однофазной сети

Схемы, приведенные на рисунке "а", "б", "д" применяются, когда выведены все шесть концов обмотки. Электродвигатели с соединением обмоток согласно схемам "а", "б", "г" практически равноценны двигателям, которые спроектированы как однофазные электродвигатели с пусковой обмоткой. Номинальная мощность при этом составляет 40-50% от мощности в трехфазном режиме, а при работе с рабочим конденсатором 75-80%. [2]

Емкость рабочего конденсатора при частоте тока 50 Гц для схем "в", "д", "е" примерно рассчитывается соответственно по формулам:

$$\begin{aligned}
 \text{в)} \quad C_{\text{раб}} &\approx 4800 \frac{I_{\text{ном}}}{U_1} \\
 \text{д)} \quad C_{\text{раб}} &\approx 2700 \frac{I_{\text{ном}}}{U_1} \\
 \text{е)} \quad C_{\text{раб}} &\approx 2800 \frac{I_{\text{ном}}}{U_1}
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

где $C_{\text{раб}}$ - емкость рабочего конденсатора, мкФ,

$I_{\text{ном}}$ - номинальный (фазный) ток статора трехфазного двигателя, А,

U_1 - напряжение однофазной сети, В.

1.5 Управление асинхронным двигателем, прямое подключение к сети питания

Использование магнитных пускателей позволяет управлять асинхронными электродвигателями путем непосредственного подключения двигателя к сети переменного тока.

С помощью магнитных пускателей можно реализовать схему:

- нереверсивного пуска: пуск и остановка;
- реверсивного пуска: пуск, остановка и реверс.

Использование теплового реле позволяет осуществить защиту электродвигателя от величин тока намного превышающих номинальное значение.

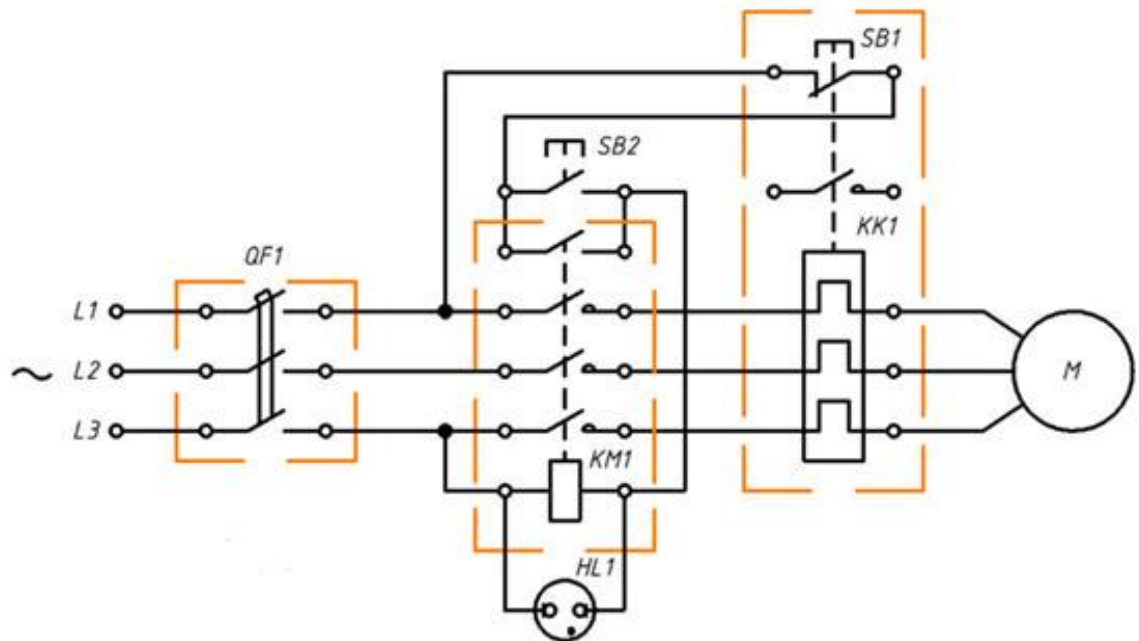


Рисунок 1.16 - Нереверсивная схема подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к трехфазной сети переменного электрического тока через магнитный пускатель

L1, L2, L3 - контакты для подключения к сети трехфазного переменного тока, QF1 - автоматический выключатель, SB1 - кнопка остановки, SB2 - кнопка пуска, KM1 - магнитный пускатель, KK1 - тепловое реле, HL1 - сигнальная лампа, М - трехфазный асинхронный двигатель

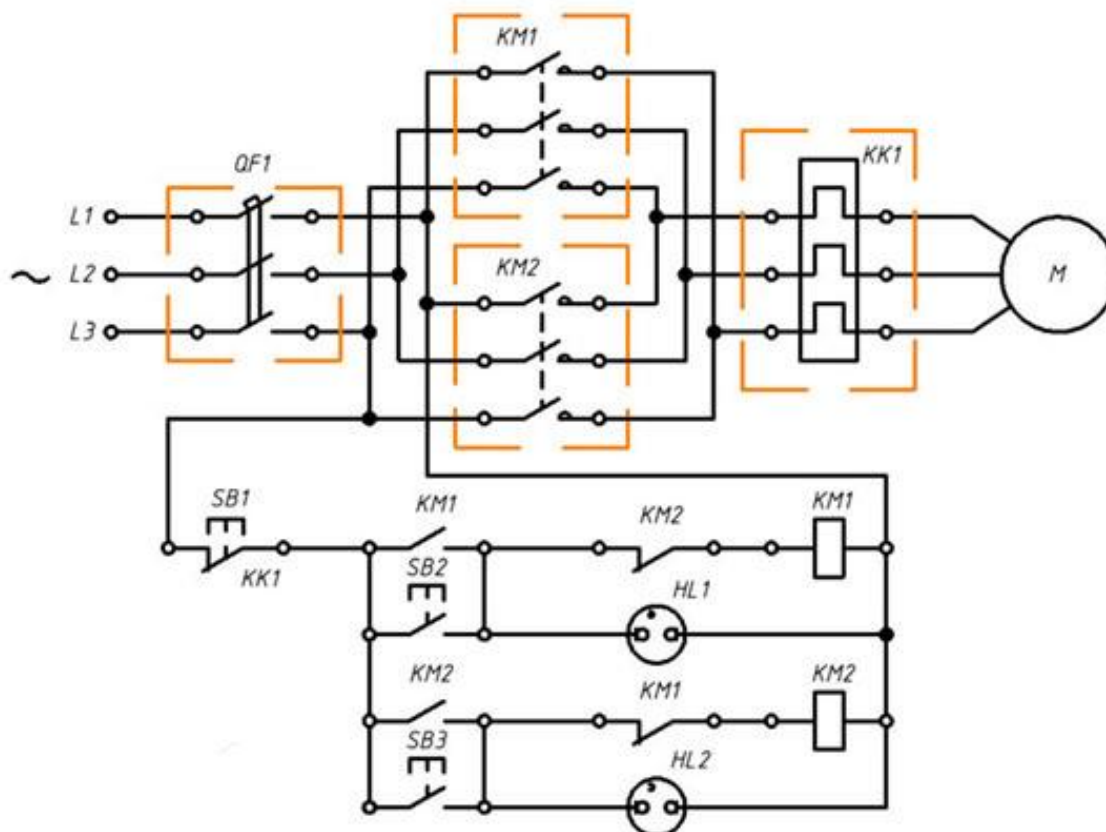


Рисунок 1.17 - Реверсивная схема подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к трехфазной сети переменного электрического тока через магнитные пускатели.

L1, L2, L3 - контакты для подключения к сети трехфазного переменного тока, QF1 - автоматический выключатель, KM1, KM2 - магнитные пускатели, KK1 - тепловое реле, М - трехфазный асинхронный двигатель, SB1 - кнопка остановки, SB2 - кнопка пуска "вперед", SB3 - кнопка пуска "назад" (реверс), HL1, HL2 - сигнальные лампы

1.6 Частотное управление асинхронным электродвигателем

Для регулирования скорости вращения и момента асинхронного двигателя используют частотный преобразователь. Принцип действия частотного преобразователя основан на изменении частоты и напряжения переменного тока.



Рисунок 1.18 - Функциональная схема частотно-регулируемого привода

В зависимости от функционала частотные преобразователи реализуют следующие методы регулирования асинхронным электродвигателем:

- скалярное управление;
- векторное управление.

Скалярное управление является простым и дешевым в реализации, но имеет следующие недостатки - медленный отклик на изменение нагрузки и небольшой диапазон регулирования. Поэтому скалярное управление обычно используется в задачах, где нагрузка либо постоянна, либо изменяется по известному закону (например, управление вентиляторами).

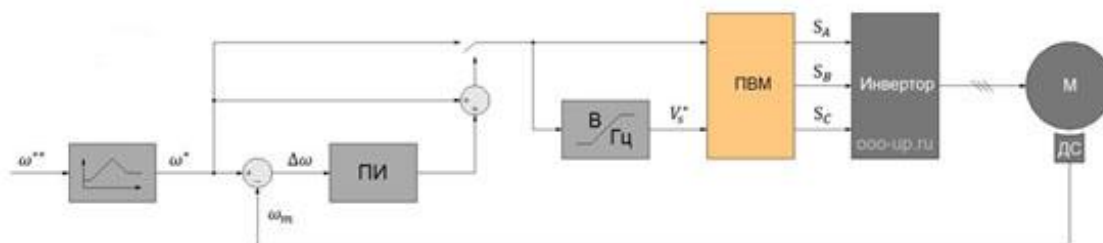
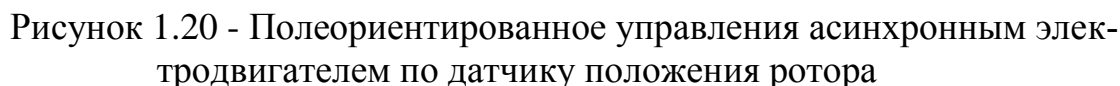


Рисунок 1.19 - Скалярное управление асинхронным двигателем с датчиком скорости

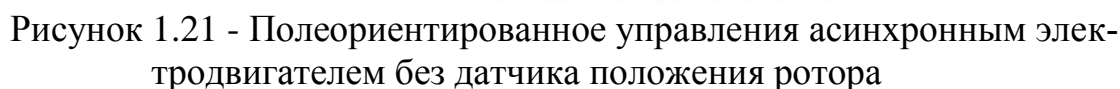
Векторное управление используется в задачах, где требуется независимо управлять скоростью и моментом электродвигателя (например, лифт), что, в частности, позволяет поддерживать постоянную скорость вращения при изменяющемся моменте нагрузки. При этом векторное управление является самым эффективным управлением с точки зрения КПД и увеличения времени работы электродвигателя.

Среди векторных методов управления асинхронными электродвигателями наиболее широкое применение получили: полеориентированное управление и прямое управление моментом.



По способу получения информации о положении потокоцепления ротора электродвигателя выделяют:

- полеориентированное управление по датчику;
- полеориентированное управление без датчика: положение потока сцепления ротора вычисляется математически на основе той информации, которая имеется в частотном преобразователе (напряжение питания, напряжения и токи статора, сопротивление и индуктивность обмоток статора и ротора, количество пар полюсов двигателя).



Прямое управление моментом имеет простую схему и высокую динамику работы, но при этом высокие пульсации момента и тока.

1.5 Управление асинхронным двигателем, прямое подключение к сети питания

Использование магнитных пускателей позволяет управлять асинхронными электродвигателями путем непосредственного подключения двигателя к сети переменного тока.

С помощью магнитных пускателей можно реализовать схему:

- нереверсивного пуска: пуск и остановка;
- реверсивного пуска: пуск, остановка и реверс.

Использование теплового реле позволяет осуществить защиту электродвигателя от величин тока намного превышающих номинальное значение.

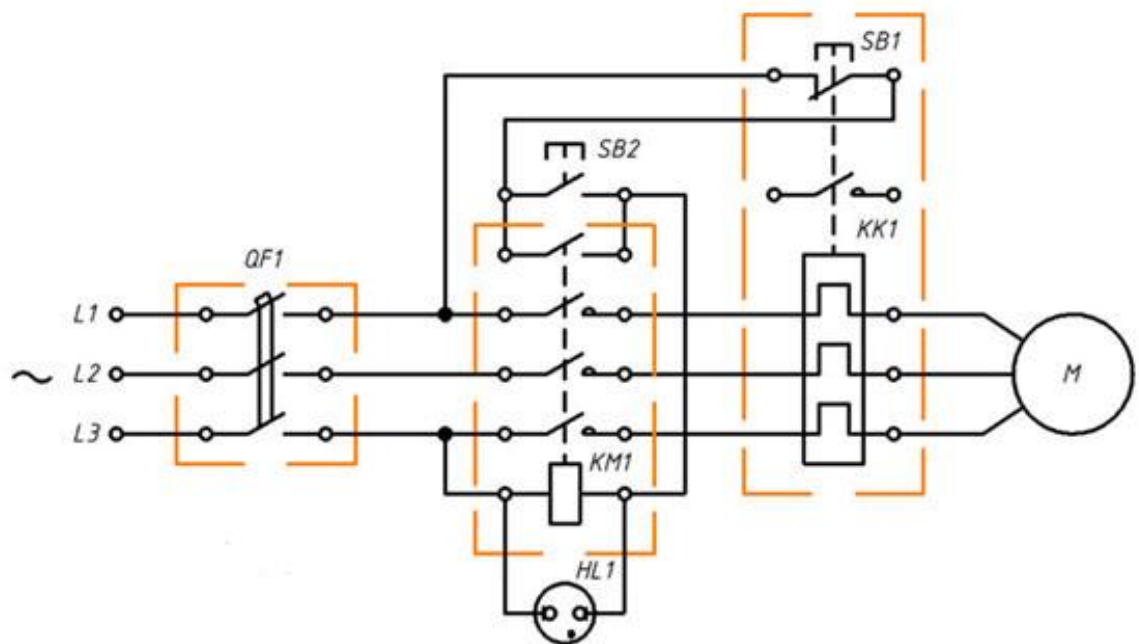


Рисунок 1.16 - Нереверсивная схема подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к трехфазной сети переменного электрического тока через магнитный пускатель

L1, L2, L3 - контакты для подключения к сети трехфазного переменного тока, QF1 - автоматический выключатель, SB1 - кнопка остановки, SB2 - кнопка пуска, KM1 - магнитный пускатель, KK1 - тепловое реле, HL1 - сигнальная лампа, М - трехфазный асинхронный двигатель

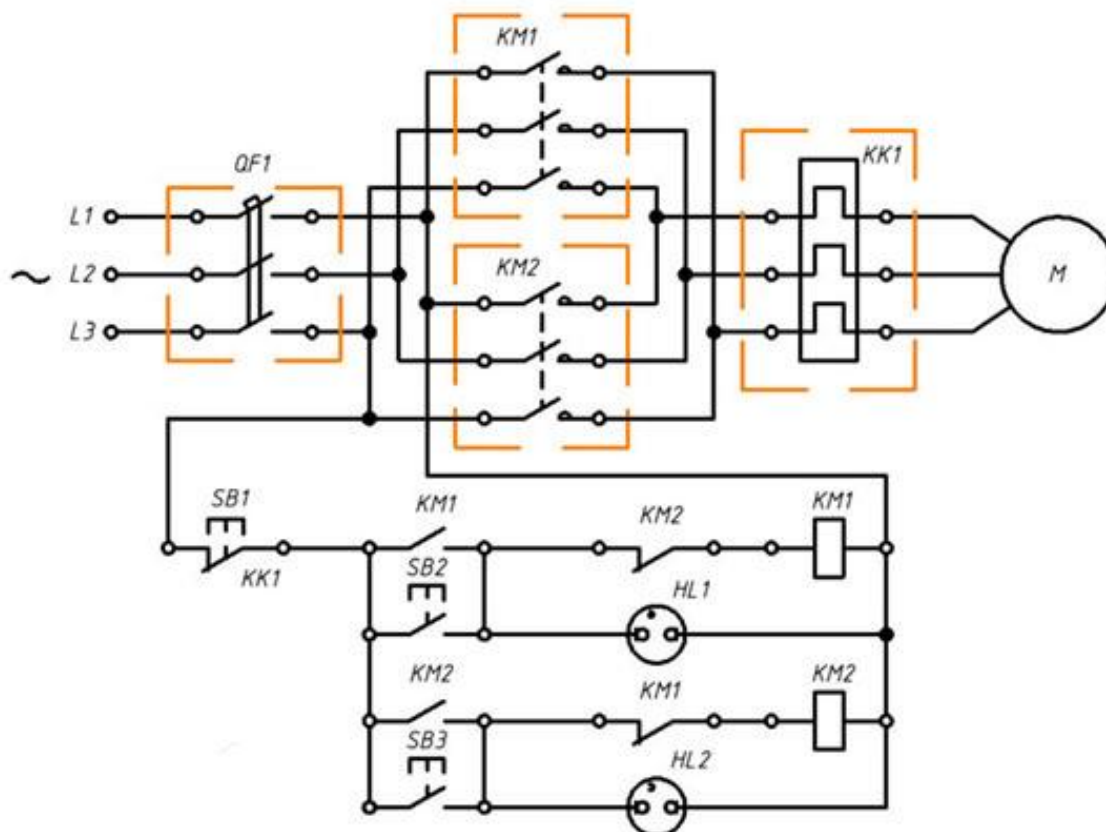


Рисунок 1.17 - Реверсивная схема подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к трехфазной сети переменного электрического тока через магнитные пускатели.

L1, L2, L3 - контакты для подключения к сети трехфазного переменного тока, QF1 - автоматический выключатель, KM1, KM2 - магнитные пускатели, KK1 - тепловое реле, M - трехфазный асинхронный двигатель, SB1 - кнопка остановки, SB2 - кнопка пуска "вперед", SB3 - кнопка пуска "назад" (реверс), HL1, HL2 - сигнальные лампы

1.6 Частотное управление асинхронным электродвигателем

Для регулирования скорости вращения и момента асинхронного двигателя используют частотный преобразователь. Принцип действия частотного преобразователя основан на изменении частоты и напряжения переменного тока.



Рисунок 1.18 - Функциональная схема частотно-регулируемого привода

В зависимости от функционала частотные преобразователи реализуют следующие методы регулирования асинхронным электродвигателем:

- скалярное управление;
- векторное управление.

Скалярное управление является простым и дешевым в реализации, но имеет следующие недостатки - медленный отклик на изменение нагрузки и небольшой диапазон регулирования. Поэтому скалярное управление обычно используется в задачах, где нагрузка либо постоянна, либо изменяется по известному закону (например, управление вентиляторами).

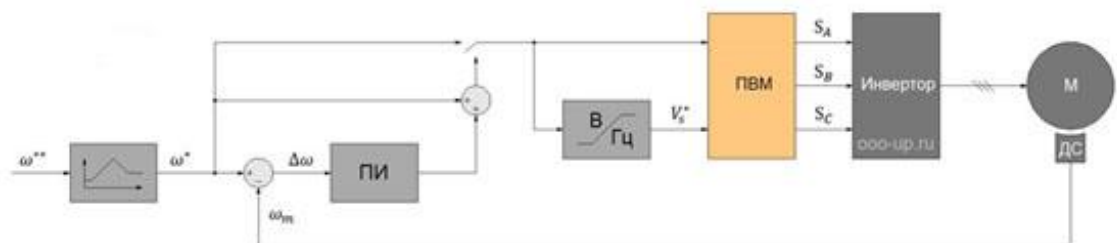


Рисунок 1.19 - Скалярное управление асинхронным двигателем с датчиком скорости

Векторное управление используется в задачах, где требуется независимо управлять скоростью и моментом электродвигателя (например, лифт), что, в частности, позволяет поддерживать постоянную скорость вращения при изменяющемся моменте нагрузки. При этом векторное управление является самым эффективным управлением с точки зрения КПД и увеличения времени работы электродвигателя.

Среди векторных методов управления асинхронными электродвигателями наиболее широкое применение получили: полеориентированное управление и прямое управление моментом.

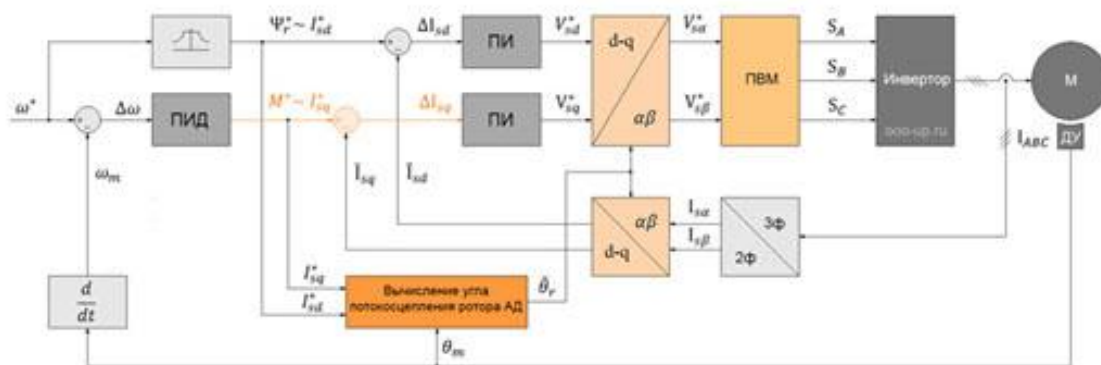


Рисунок 1.20 - Полеориентированное управления асинхронным электродвигателем по датчику положения ротора

Полеориентированное управление позволяет плавно и точно управлять параметрами движения (скоростью и моментом), но при этом для его реализации требуется информация о направлении вектора потокосцепления ротора двигателя.

По способу получения информации о положении потокосцепления ротора электродвигателя выделяют:

- полеориентированное управление по датчику;
- полеориентированное управление без датчика: положение потокосцепления ротора вычисляется математически на основе той информации, которая имеется в частотном преобразователе (напряжение питания, напряжения и токи статора, сопротивление и индуктивность обмоток статора и ротора, количество пар полюсов двигателя).

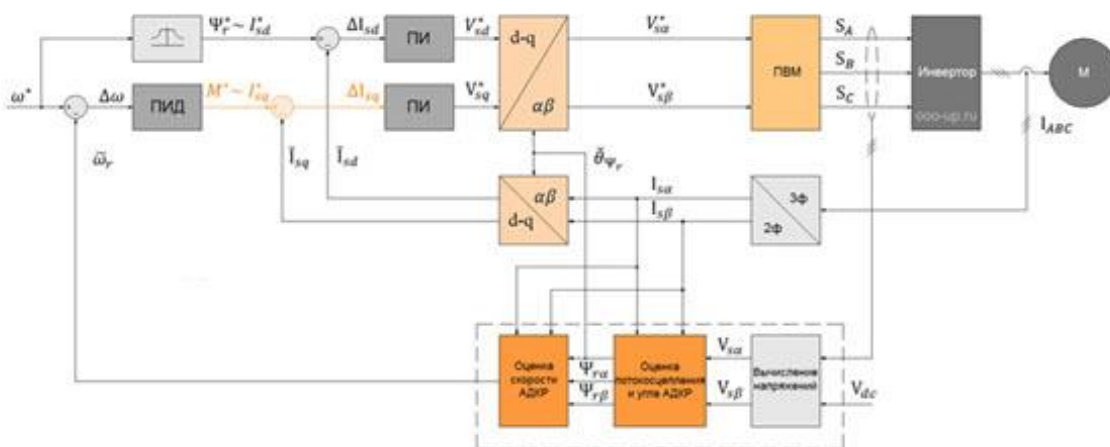


Рисунок 1.21 - Полеориентированное управления асинхронным электродвигателем без датчика положения ротора

Прямое управление моментом имеет простую схему и высокую динамику работы, но при этом высокие пульсации момента и тока.

2 Математическое описание электропривода переменного тока

В связи с постоянным расширением области применения машин переменного тока в регулируемом электроприводе рассматриваются модели и задачи анализа электрических машин, как элементов сложных замкнутых электромеханических систем. Разрабатываются математические модели и методы исследования свойств электрических машин, ориентированные на задачи управления и оптимизации их режимов работы по различным критериям. Модель машины призвана служить инструментом поиска ее оптимальных режимов и определения обеспечивающих эти режимы величин контролируемых внешних воздействий на машину. Последние превращаются таким образом из заданных в искомые функции времени и координат состояния системы, а модель - в инструмент синтеза ее управляющей части.

При решении каждой конкретной задачи модель должна быть максимально упрощена за счет отбрасывания второстепенных факторов. В связи со сложностью алгоритмов поиска оптимальных управлений и фактором нелинейности машины как объекта управления удачный выбор модели объекта является залогом успешного решения задачи. Поэтому в распоряжении исследователя должен быть набор моделей, наиболее хорошо приспособленных для решения различных конкретных задач.[3 с. 364]

2.1 Математическое описание трехфазного асинхронного двигателя

В качестве математического описания трехфазного асинхронного двигателя используем математическое описание обобщенной асинхронной машины, которая базируется на известных законах.

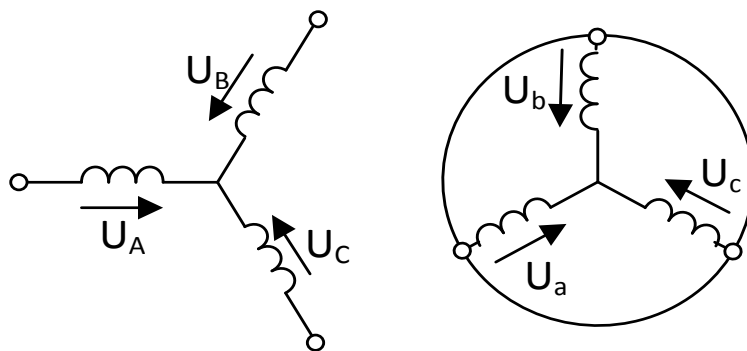


Рисунок 2.1 - Обобщенная асинхронная машина

Уравнения равновесия рисунок 2.1 на обмотках статора и ротора базируются на втором законе Кирхгофа Э.Д.С. для статора (2.1) и ротора (2.2):

$$\begin{cases} u_{As} = i_{As} \cdot R_s + \frac{d\Psi_{As}}{dt}, \\ u_{Bs} = i_{Bs} \cdot R_s + \frac{d\Psi_{Bs}}{dt}, \\ u_{Cs} = i_{Cs} \cdot R_s + \frac{d\Psi_{Cs}}{dt}. \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} u_{Ar} = i_{Ar} \cdot R_r + \frac{d\Psi_{Ar}}{dt}, \\ u_{Br} = i_{Br} \cdot R_r + \frac{d\Psi_{Br}}{dt}, \\ u_{Cr} = i_{Cr} \cdot R_r + \frac{d\Psi_{Cr}}{dt}. \end{cases} \quad (2.2)$$

где $\Psi_{As}, \Psi_{Bs}, \Psi_{Cs}$ - потокосцепления обмоток соответствующих фаз статора,
 $\Psi_{Ar}, \Psi_{Br}, \Psi_{Cr}$ - потокосцепления обмоток соответствующих фаз ротора.

Потокосцепление каждой фазы является функцией токов всех фаз машины:

Для статора

$$\begin{cases} \Psi_{As} = l_s i_{As} + m_s (i_{Bs} + i_{Cs}) + m_{sr} [i_{ar} \cdot \cos \theta + i_{br} \cdot \cos(\theta + \alpha) + i_{cr} \cdot \cos(\theta + 2\alpha)], \\ \Psi_{Bs} = l_s i_{Bs} + m_s (i_{As} + i_{Cs}) + m_{sr} [i_{ar} \cdot \cos(\theta + 2\alpha) + i_{br} \cdot \cos \theta + i_{cr} \cdot \cos(\theta + \alpha)], \\ \Psi_{Cs} = l_s i_{Cs} + m_s (i_{As} + i_{Bs}) + m_{sr} [i_{ar} \cdot \cos(\theta + \alpha) + i_{br} \cdot \cos(\theta + 2\alpha) + i_{cr} \cdot \cos \theta]. \end{cases} \quad (2.3)$$

Для ротора

$$\begin{cases} \Psi_{ar} = l_r i_{ar} + m_r (i_{br} + i_{cr}) + m_{sr} [i_{as} \cdot \cos \theta + i_{bs} \cdot \cos(\theta + 2\alpha) + i_{cs} \cdot \cos(\theta + \alpha)], \\ \Psi_{br} = l_r i_{br} + m_r (i_{ar} + i_{cr}) + m_{sr} [i_{as} \cdot \cos(\theta + \alpha) + i_{bs} \cdot \cos \theta + i_{cs} \cdot \cos(\theta + 2\alpha)], \\ \Psi_{cr} = l_r i_{cr} + m_r (i_{ar} + i_{br}) + m_{sr} [i_{as} \cdot \cos(\theta + 2\alpha) + i_{bs} \cdot \cos(\theta + \alpha) + i_{cs} \cdot \cos \theta]. \end{cases} \quad (2.4)$$

где l_s, l_r - индуктивность обмотки фазы соответственно статора и ротора,
 m_s, m_r - взаимная индуктивность между двумя обмотками статора и ротора,
 m_{sr} - взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора при совпадении их осей, θ - угол расположенный между соответствующими обмотками статора и ротора.[8 с. 248-255]

Добавляем основное уравнение динамики:

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

Для связи уравнения движения и уравнений Кирхгофа вводим выраже-

ние электромагнитной энергии:

$$W_{эм} = \frac{1}{2} (\Psi_{As} \cdot i_{As} + \Psi_{Bs} \cdot i_{Bs} + \Psi_{Cs} \cdot i_{Cs} + \Psi_{ar} \cdot i_{As} + \Psi_{br} \cdot i_{Bs} + \Psi_{cr} \cdot i_{Cs}) \quad (2.6)$$

$$M = \frac{dW_{эм}}{d\theta_{эом}} = \frac{dW_{эм}}{d\theta_{эл}} p_{п} \quad (2.7)$$

$$\theta_{эом} = \frac{\theta_{эл}}{p_{п}}, \quad (2.8)$$

где $p_{п}$ - число пар полюсов

В таком виде система громоздка и трудоёмка, поэтому она преобразуется к новой координатной системе позволяющей сохранить число уравнений и избавиться от периодических коэффициентов.[8 с. 248-255]

2.2 Введение обобщённого пространственного комплекса

Возьмём трёхфазную систему напряжений:

$$\begin{cases} u_{As} = U_m \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi), \\ u_{Bs} = U_m \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi + 120^\circ), \\ u_{Cs} = U_m \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi + 240^\circ). \end{cases} \quad (2.9)$$

$\dot{u}_0 = 0$, так как система без нулевого провода.

$\dot{u}_2 = 0$, так как система симметрична.

$$\dot{u}_1 = \frac{2}{3} (u_{As} + a \cdot u_{Bs} + a^2 \cdot u_{Cs}),$$

где $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ - оператор поворота.

Воспользовавшись формулой Эйлера $\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$, после преобразования получим:

$$\dot{u}_1 = U_m \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega_0 t} = \dot{U}_m \cdot e^{j\omega_0 t} \quad (2.10)$$

где \dot{u}_1 - пространственный комплекс напряжений,

\dot{U}_m - комплексная амплитуда напряжений, вращающаяся со скоростью ω_0 .

Аналогичные преобразования можно выполнить для токов статора и ротора и потокосцеплений статора и ротора: $\dot{I}_{1s}, \dot{I}_{1r}, \dot{\Psi}_{1s}, \dot{\Psi}_{1r}$

Для каждой переменной количество уравнений уменьшилось в 3 раза.

$$\begin{cases} \dot{U}_{1s} = \dot{I}_{1s} \cdot R_s + \frac{d\dot{\Psi}_{1s}}{dt}, \\ 0 = \dot{I}_{1r} \cdot R_r + \frac{d\dot{\Psi}_{1r}}{dt}, \\ \dot{\Psi}_{1s} = L_{1s} \dot{I}_{1s} + \dot{I}_{1r}, \\ \dot{\Psi}_{1r} = L_{1r} \dot{I}_{1r} + \dot{I}_{1s}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Повернём ротор, где бы оси обмоток ротора совпадали с осями фаз статора, в новой комплексной системе координат придаётся скорость вращения ω_κ и вводятся новые переменные.[8 с. 248-255]

$$\bar{u}_1 = \dot{U}_{1s} \cdot e^{j\theta_\kappa}; \quad \bar{i}_1 = \dot{I}_{1s} \cdot e^{j\theta_\kappa}; \quad \bar{\psi}_1 = \dot{\Psi}_{1s} \cdot e^{j\theta_\kappa}; \quad \bar{i}_2 = \dot{I}_{1r} \cdot e^{-j\theta}; \quad \bar{\psi}_2 = \dot{\Psi}_{1r} \cdot e^{-j\theta}. \quad (2.12)$$

Уравнение баланса статорной цепи:

$$\bar{u}_1 \cdot e^{j\theta_\kappa} = \bar{i}_1 \cdot e^{j\theta_\kappa} \cdot R_s + \frac{d}{dt}(\bar{\psi}_1 \cdot e^{j\theta_\kappa}) = \bar{i}_1 \cdot R_s \cdot e^{j\theta_\kappa} + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} \cdot e^{j\theta_\kappa} + j\bar{\psi}_1 \cdot \frac{d\theta_\kappa}{dt} \cdot e^{j\theta_\kappa} = \bar{i}_1 \cdot R_1 + j\bar{\psi}_1 \cdot \omega_\kappa + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt}. \quad (2.13)$$

Уравнение баланса роторной цепи:

$$\begin{aligned} 0 &= \bar{i}_2 \cdot e^{j\theta_\kappa} \cdot e^{-j\theta} \cdot R_r + \frac{d}{dt}(\bar{\psi}_2 \cdot e^{j\theta_\kappa} \cdot e^{-j\theta}) = \bar{i}_2 \cdot R_2 + j\bar{\psi}_2 \cdot \frac{d(\theta_\kappa - \theta)}{dt} + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} \\ 0 &= \bar{i}_2 \cdot R_2 + j\bar{\psi}_2 \cdot (\omega_\kappa - \omega) + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Потокосцепление статора:

$$\bar{\psi}_1 \cdot e^{j\theta_\kappa} = L_s \cdot \bar{i}_1 \cdot e^{j\theta_\kappa} + M \cdot \bar{i}_2 \cdot e^{j\theta_\kappa - j\theta + j\theta} = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_{12} \cdot \bar{i}_2. \quad (2.15)$$

Потокосцепление ротора:

$$\bar{\psi}_2 \cdot e^{j\theta_\kappa} = L_r \cdot \bar{i}_2 \cdot e^{j\theta_\kappa} \cdot e^{-j\theta} + M \cdot \bar{i}_1 \cdot e^{j\theta_\kappa - j\theta} = L_2 \cdot \bar{i}_2 + L_{12} \cdot \bar{i}_1. \quad (2.16)$$

Из (2.13 - 2.16) получим систему уравнений асинхронной машины:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = \bar{i}_1 \cdot R_1 + j\bar{\psi}_1 \cdot \omega_k + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt}, \\ 0 = \bar{i}_2 \cdot R_2 + j\bar{\psi}_2 \cdot (\omega_k - \omega) + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt}, \\ \bar{\psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_{12} \cdot \bar{i}_2, \\ \bar{\psi}_2 = L_2 \cdot \bar{i}_2 + L_{12} \cdot \bar{i}_1. \end{cases} \quad (2.17)$$

Для симметричной асинхронной машины получим линейную систему с постоянными коэффициентами из (2.17) в которой исключены периодические коэффициенты.

Дополним (2.17) уравнением связи электромагнитного момента с электромагнитными величинами:

$$M = \frac{3}{2} p_{\pi} L_m \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_s \times \bar{i}_s). \quad (2.18)$$

Основное уравнение динамики:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (2.19)$$

Приведём уравнения к относительным единицам, для этого умножим и разделим переменные на базовые величины. В качестве основных базовых величин выбираются амплитудные номинальные значения фазного напряжения и тока, а также номинальное значение угловой частоты, потокосцепления и момента.[9 с. 393-402]

$$U_{\bar{o}} = \sqrt{2}U_1, \quad I_{\bar{o}} = \sqrt{2}I_1, \quad \omega_{\bar{o}} = 2\pi f_1, \quad \Psi_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}}, \quad M_{\bar{o}} = \frac{3}{2} p_{\pi} \frac{U_{\bar{o}} I_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}}. \quad (2.20)$$

Умножим и разделим переменные на их базовые значения:

$$\begin{cases} \frac{\vec{u}_{1s}}{U_{\bar{\sigma}}} = \frac{R_s I_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{i}_{1s}}{I_{\bar{\sigma}}} + \frac{\Psi_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}} \frac{d\vec{\Psi}_{1s}/\Psi_{\bar{\sigma}}}{dt} + j \frac{\omega_k \Psi_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{\Psi}_{1s}}{\Psi_{\bar{\sigma}}}, \\ 0 = \frac{R_r I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{i}_{1r}}{I_{\bar{\sigma}}} + \frac{d\vec{\Psi}_{1r}/\Psi_{\bar{\sigma}}}{dt} + j(\omega_k - p_n \omega) \frac{\vec{\Psi}_{1r}}{\Psi_{\bar{\sigma}}}, \\ \frac{\vec{\Psi}_{1s}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = \frac{L_s I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{i}_{1s}}{I_{\bar{\sigma}}} + \frac{L_m I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{i}_{1r}}{I_{\bar{\sigma}}}, \\ \frac{\vec{\Psi}_{1r}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = \frac{L_R I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{i}_{1r}}{I_{\bar{\sigma}}} + \frac{L_m I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} \frac{\vec{i}_{1s}}{I_{\bar{\sigma}}}. \end{cases} \quad (2.21)$$

Переменные в относительных единицах

$$\frac{\vec{u}_{1s}}{U_{\bar{\sigma}}} = \vec{u}_s, \quad \frac{\vec{i}_{1s}}{I_{\bar{\sigma}}} = \vec{i}_s, \quad \frac{\vec{\Psi}_{1s}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = \vec{\Psi}_s, \quad \frac{\vec{i}_{1r}}{I_{\bar{\sigma}}} = \vec{i}_r, \quad \frac{\vec{\Psi}_{1r}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = \vec{\Psi}_r. \quad (2.22)$$

Коэффициенты в относительных единицах

$$\frac{R_s I_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}} = r_s, \quad \frac{R_r I_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}} = r_r, \quad \frac{L_s I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = L_s, \quad \frac{L_R I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = L_r, \quad \frac{L_m I_{\bar{\sigma}}}{\Psi_{\bar{\sigma}}} = L_m. \quad (2.23)$$

Электромагнитный момент

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s), \quad \frac{M}{M_{\bar{\sigma}}} = \frac{L_m \omega_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}} I_{\bar{\sigma}}} \cdot \text{Mod}(\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s). \quad (2.24)$$

Электромагнитный момент в относительных единицах:

$$m = k \cdot \text{Mod}(\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s), \quad (2.25)$$

где $m = \frac{M}{M_{\bar{\sigma}}}, \quad k = \frac{L_m \omega_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}} I_{\bar{\sigma}}}.$

Основное уравнение динамики электропривода:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad \frac{J \omega_{\bar{\sigma}}}{M_{\bar{\sigma}}} \frac{d\omega/\omega_{\bar{\sigma}}}{dt} = \frac{M}{M_{\bar{\sigma}}} - \frac{M_c}{M_{\bar{\sigma}}}. \quad (2.26)$$

В относительных единицах основное уравнение динамики:

$$T_m \frac{d\omega_1}{dt} = m - m_c \quad (2.27)$$

Обобщенная система уравнений асинхронной машины в относительных единицах примет вид:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s, \\ \bar{u}_r = r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p_n \omega_1) \bar{\psi}_r, \\ \bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r, \\ \bar{\psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r, \\ m = k \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_s \times \bar{i}_s), \\ T_m \frac{d\omega_1}{dt} = m - m_c. \end{cases} \quad (2.28)$$

2.3 Описание асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

Описание асинхронной машины с короткозамкнутым ротором получается из описания обобщенной машины при положении, что $u_R=0$.

$$\begin{cases} \bar{u}_s = r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s, \\ 0 = r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p_n \omega_1) \bar{\psi}_r, \\ \bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r, \\ \bar{\psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r, \\ m = k \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_s \times \bar{i}_s), \\ T_m \frac{d\omega_1}{dt} = m - m_c. \end{cases} \quad (2.29)$$

Исключив из системы (2.29) $\bar{\psi}_s$ и $\bar{\psi}_r$, после преобразований получим:

$$\begin{cases} \overline{u_s} = r\overline{i_s} + L'_s \frac{d\overline{i_s}}{dt} + j\omega_k L'_s \overline{i_s} - \frac{k_R}{T_R} \overline{\psi_r} + jk_R p_{\Pi} \omega_1 \overline{\psi_r}, \\ 0 = -k_R r_r \overline{i_s} + \frac{1}{T_R} \overline{\psi_r} + \frac{d\overline{\psi_r}}{dt} + j(\omega_k - p_{\Pi} \omega_1) \overline{\psi_r}, \\ m = k \cdot \text{Mod}(\overline{\psi_s} \times \overline{i_s}), \\ T_m \frac{d\omega_1}{dt} = m - m_c. \end{cases} \quad (2.30)$$

где $r = (r_s + k_R^2 r_r)$; $L'_s = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right)$; $k_R = \frac{L_m}{L_r}$; $T_R = \frac{L_r}{r_r}$.

В операторной форме система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \overline{u_s} = r\overline{i_s} + L'_s \overline{i_s} p + j\omega_k L'_s \overline{i_s} - \frac{k_R}{T_R} \overline{\psi_r} + jk_R p_{\Pi} \omega_1 \overline{\psi_r}, \\ 0 = -k_R r_r \overline{i_s} + \frac{1}{T_R} \overline{\psi_r} + \overline{\psi_r} p + j(\omega_k - p_{\Pi} \omega_1) \overline{\psi_r}, \\ m = k \cdot \text{Mod}(\overline{\psi_s} \times \overline{i_s}), \\ T_m \omega_1 p = m - m_c. \end{cases} \quad (2.31)$$

Структурная схема асинхронного короткозамкнутого двигателя зависит от выбора базового вектора, который определяется скоростью вращения координат $\overline{i_{\text{вп}}} = i_x + ji_y = I_m e^{j(\omega_1 - \omega_k t)} = \overline{i_{\text{н}}} e^{-j\omega_k t}$. За базовый вектор принимается тот, который при анализе совмещается с одной из осей системы координат.[9 с. 393-402]

$$\begin{cases} u_{Sx} = r(1 + T'_s p) i_{Sx} - \omega_k L'_s i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{rx} - k_R p_{\Pi} \omega_1 \psi_{ry}, \\ u_{Sy} = r(1 + T'_s p) i_{Sy} + \omega_k L'_s i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{ry} + k_R p_{\Pi} \omega_1 \psi_{rx} \\ 0 = -k_R r_r i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{rx} + p \psi_{rx} - (\omega_k - p_{\Pi} \omega_1) \psi_{ry}, \\ 0 = -k_R r_r i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{ry} + p \psi_{ry} + (\omega_k - p_{\Pi} \omega_1) \psi_{rx}, \\ m = 1.5 p_{\Pi} k_R (\psi_{rx} i_{Sy} - \psi_{ry} i_{Sx}), \\ T_m p \omega_1 = M - M_c. \end{cases} \quad (2.32)$$

Если за базовый вектор принять вектор \bar{u}_s то система координат будет вращаться со скоростью равной угловой частоте напряжения питания, совмещающая вектор \bar{u}_s с осью «х» вращающейся системы координат и в уравнениях принимаем $\bar{u}_{sx} = U_1, \bar{u}_{sy} = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = r(1 + T'_S p) i_{sx} - \omega_k L'_S i_{sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{rx} - k_R p_\Pi \omega_1 \psi_{ry}, \\ 0 = r(1 + T'_S p) i_{sy} + \omega_k L'_S i_{sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{ry} + k_R p_\Pi \omega_1 \psi_{rx}, \\ 0 = -k_R r_r i_{sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{rx} + p \psi_{rx} - (\omega_k - p_\Pi \omega_1) \psi_{ry}, \\ 0 = -k_R r_r i_{sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{ry} + p \psi_{ry} + (\omega_k - p_\Pi \omega_1) \psi_{rx}, \\ m = 1.5 p_\Pi k_R (\psi_{rx} i_{sy} - \psi_{ry} i_{sx}), \\ T_m p \omega_1 = m - m_C. \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Преобразуем:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 + \omega_k L'_S i_{sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{rx} + k_R p_\Pi \omega_1 \psi_{ry} = r(1 + T'_S p) i_{sx}, \\ \frac{k_R}{T_R} \psi_{ry} - \omega_k L'_S i_{sx} - k_R p_\Pi \omega_1 \psi_{rx} = r(1 + T'_S p) i_{sy}, \\ k_R r_r i_{sx} + (\omega_k - p_\Pi \omega_1) \psi_{ry} = \frac{\psi_{rx}}{T_R} (1 + T_R p), \\ k_R r_r i_{sy} - (\omega_k - p_\Pi \omega_1) \psi_{rx} = \frac{\psi_{ry}}{T_R} (1 + T_R p), \\ m = 1.5 p_\Pi k_R (\psi_{rx} i_{sy} - \psi_{ry} i_{sx}), \\ T_m p \omega_1 = m - m_C. \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Структурная схема модели асинхронного двигателя в двухфазной системе координат с базовым вектором напряжения построенная по уравнениям (2.34) изображена на графическом листе 1.

3 Моделирование электромеханических систем в пакете Simulink системы MATLAB

3.1 Краткие сведения о пакете динамического моделирования Simulink системы MATLAB

Пакет Simulink предназначен для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой моделью. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя и по существу является типичным средством визуально-ориентированного программирования.

Используя палитры компонентов (наборы) блок-схем, пользователь с помощью мыши переносит нужные компоненты с палитр на рабочий стол пакета Simulink и соединяет линиями входы и выходы блоков. Таким образом создается блок-схема моделирования системы или устройства. Simulink автоматизирует следующий, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства. Средства визуализации результатов моделирования в пакете Simulink настолько наглядны, что создается ощущение, что созданная в виде блок-схемы модель работает как «живая».[7 с. 496]

Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных объектов, используя которые можно исследовать практически любую систему автоматического регулирования. Практически для всех блоков существует возможность настройки параметров. Параметры настройки отражаются в панели окна настройки выбранного блока. Кнопка Help на панели окна настройки открывает подробную информацию о блоке и его параметрах настройки.

Библиотека системы Simulink содержит следующие разделы:

- Continuous - блоки аналоговых элементов;
- Discontinuous - блоки нелинейных элементов;
- Diskrete - блоки дискретных элементов;
- Look-Up- Tables - блоки таблиц;
- Math Operations - блоки элементов, определяющих математические операции;
- Model Verification - блоки проверки свойств сигналов;
- Ports&Sibsystems - порты и подсистемы;
- Signal Attributes - блоки задания свойств сигналов;
- Signal Routing - блоки маршрутизации сигналов;
- Sinks - блоки приема и отображения сигналов;
- Sources - блоки источников сигнала;

- User-Defined Function - функции, определяемые пользователем.

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида: пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого - символ «-».[7 с. 496]

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши.

При выборе соответствующего раздела библиотеки его содержимое отображается в правой части окна.

Приведем описание библиотек и некоторых их блоков.

Continuous (Непрерывные блоки). Непрерывные блоки наиболее широко используются при моделировании систем управления электроприводом. Библиотека «Непрерывные блоки» содержит:

Integrator - аналоговый интегратор;

Derivative - звено аналогового дифференцирования;

Transfer Fcn - линейное аналоговое звено, заданное своей передаточной функцией;

State-Space - линейная аналоговая система, заданная в виде уравнений состояния, то есть в виде системы уравнений, представленных в форме Коши;

Transport Delay - блок памяти, выполняющий задержку, устанавливаемую в поле настройки.

В библиотеке содержатся и другие блоки.

Блок Transfer Fcn наиболее широко используется при моделировании систем управления. Передаточная функция звена автоматического регулирования в общем случае записывается в виде
$$W(s) = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}.$$

Коэффициенты числителя этой функции a_i следует ввести в поле Numerator через пробел, начиная с a_m при старшей производной. Аналогично заполняется поле знаменателя Denominator. Необходимое условие $n \geq m$.

Окно настройки блока Transfer Fcn и сам блок изображены на рис. 3.1.

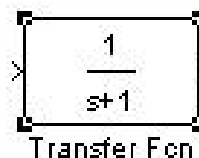
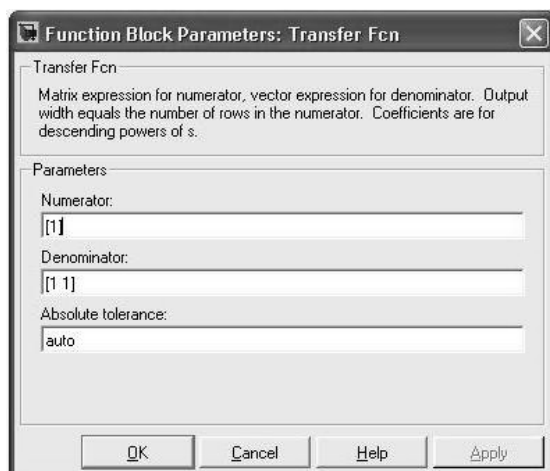


Рисунок 3.1 - Панель настройки блока Transfer Fcn и сам блок

Следовательно этот блок можно использовать для создания П-регулятора, ПИ-регулятора, а также апериодического и колебательного звеньев.

Библиотека Math Operations (библиотека математических функций) содержит:

Sum - аналоговый сумматор, позволяющий алгебраически суммировать любое число сигналов на входе и имеющий один выход;

Product - вычислитель, формирующий на выходе результат умножения или деления двух и более входных сигналов;

Gain - аналоговый усилитель;

Slider Gain - аналоговый усилитель с интерактивной настройкой параметров;

Matrix Gain -усилитель, на вход которого подается вектор;

Abs - блок, формирующий на выходе абсолютное значение входного сигнала;

Sign - блок-реле, реагирующий на знак входного сигнала. Значение выходного сигнала устанавливается в окне настройки;

В библиотеке содержатся и другие блоки.

Discontinuous (блоки нелинейных элементов). Блоки нелинейных элементов:

Rate Limiter - обеспечивает различные коэффициенты передачи в зависимости от знака входного сигнала. В окне настройки устанавливаются значения этих коэффициентов;

Saturation - усилитель с ограничением. Величина выходного сигнала при положительном и отрицательном входе устанавливается в окне настройки;

Dead Zone - реализует зону нечувствительности (например, при моделировании зазора в механической передаче);

Relay - реле с регулируемой зоной нечувствительности и устанавливаемой величиной положительного и отрицательного сигнала;

Switch - ключ, который переключается, когда входной сигнал становится равным (или большим) заданному в поле настройки;

Manual Switch - ключ, который переключается вручную. В процессе моделирования при помощи данного ключа удобно менять параметры и структуру модели.[7 с. 496]

Библиотека Ports&Sibsystems (порты и подсистемы). Подсистема - это фрагмент Simulink-модели, оформленный в виде отдельного блока. Использование подсистем при составлении модели имеет следующие положительные стороны:

1. Уменьшает количество одновременно отображаемых блоков на экране, что облегчает восприятие модели (в идеале модель полностью должна отображаться на экране монитора).

2. Позволяет создавать и отлаживать фрагменты модели по отдельности, что повышает технологичность создания модели.

3. Позволяет создавать собственные библиотеки.

4. Дает возможность синхронизации параллельно работающих подсистем.

5. Позволяет включать в модель собственные справочные средства.

6. Дает возможность связывать подсистему с каким-либо m-файлом, обеспечивая запуск этого файла при открытии подсистемы (нестандартное открытие подсистемы).

Использование подсистем и механизма их блоков позволяет создавать блоки, не уступающие стандартным по своему оформлению (собственное окно параметров блока, пиктограмма, справка и т. п.).

Количество подсистем в модели не ограничено, кроме того подсистемы могут включать в себя другие подсистемы. Уровень вложенности подсистем друг в друга также не ограничен.

Связь подсистемы с моделью (или подсистемой верхнего уровня иерархии) выполняется с помощью входных (блок Inport библиотеки Sources) и выходных (блок Outport библиотеки Sinks) портов. Добавление в подсистему входного или выходного порта приводит к появлению на изображении подсистемы метки порта, с помощью которой внешние сигналы передаются внутрь подсистемы или выводятся в основную модель. Переименование блоков Inport или Outport позволяет изменить метки портов, отображаемые на пиктограмме подсистемы со стандартных (In и Out) на те, которые нужны пользователю.[7 с. 496]

Подсистемы могут быть виртуальными (Subsystem) и монолитными (Atomic Subsystem). Отличие этих видов подсистем заключается в порядке выполнения блоков во время расчета. Если подсистема является виртуальной, то Simulink игнорирует наличие границ, отделяющих такую подсистему от модели, при определении порядка расчета блоков. Иными словами, в виртуальной системе сначала могут быть рассчитаны выходные

сигналы нескольких блоков, затем выполнен расчет блоков в основной модели, после чего вновь выполнен расчет блоков входящих в подсистему. Монолитная подсистема считается единым (неделимым) блоком, и Simulink выполняет расчет всех блоков в такой подсистеме, не переключаясь на расчеты других блоков в основной модели. Изображение монолитной подсистемы имеет более толстую рамку по сравнению с виртуальной подсистемой.

Подсистемы могут быть также управляемыми или неуправляемыми. Управляемые подсистемы всегда являются монолитными. Управляемые подсистемы имеют дополнительные (управляющие) входы, на которые поступают сигналы, активизирующие данную подсистему. Управляющие входы расположены сверху или снизу подсистемы. Когда управляемая подсистема активизирована, она выполняет вычисления. Если управляемая подсистема пассивна, то она не выполняет вычисления, а значения сигналов на ее выходах определяются настройками выходных портов.

Для создания в модели подсистемы можно воспользоваться двумя способами:

1. Скопировать нужную подсистему из библиотеки Subsystem в модель.
2. Выделить с помощью мыши нужный фрагмент модели и выполнить команду Create Subsystem из меню Edit окна модели. Выделенный фрагмент будет помещен в подсистему, а входы и выходы подсистемы будут снабжены соответствующими портами. Данный способ позволяет создать виртуальную неуправляемую подсистему. В дальнейшем, если это необходимо, можно сделать подсистему монолитной, изменив ее параметры, или управляемой, добавив управляющий элемент из нужной подсистемы находящейся в библиотеке. Отменить группировку блоков в подсистему можно командой Undo.[7 с. 496]

Процесс создания подсистемы вторым способом изображен на рисунке 3.2. На рисунке 3.3 показан результат этого процесса.

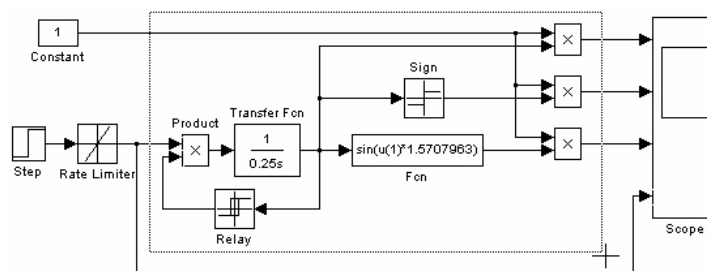


Рисунок 3.2 - Создание подсистемы

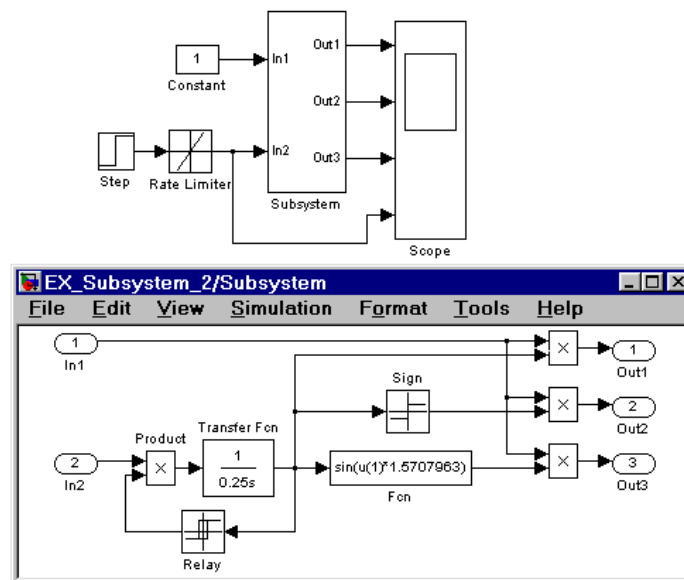


Рисунок 3.3 - Модель, использующая подсистему

Библиотека Sinks (приема и отображения сигналов) содержит приборы для наблюдения и регистрации процессов в исследуемой модели. В состав виртуальных приборов входят:

Scope - осциллоскоп для наблюдения временных зависимостей;

XY Graph - графопостроитель в системе полярных координат (для построения зависимости одной переменной от другой, например $\varphi(\alpha)$).

Display - устройство для вывода на экран дисплея.

Библиотека Sources (источников сигнала).

Набор блоков содержит практически все необходимые источники сигналов для исследования электропривода. Возможно задание произвольного воздействия из файла - блок From File. Кроме источников детерминированных воздействий с различной функциональной и временной зависимостью имеются источники случайных воздействий с различными законами распределения. С каждым графическим элементом связано окно настроек. Так, для генератора периодических сигналов (Signal Generator) соответствующие поля содержат выбор формы периодического сигнала (Waveform), установку амплитуды сигнала (Amplitude), установку частоты (Frequency) и выбор единиц измерения установленной частоты (в раскрывающемся меню предлагается два варианта: герцы и радианы в секунду). [7 с. 496]

Окно настройки блока Step («ступенька») имеет поля настройки, где задаются момент подачи сигнала (Step time), начальное значение сигнала (Initial value), конечное значение сигнала (Final Value).

Окна настроек активизируются после переноса источника сигнала в рабочую область моделирования. Каждое окно настроек имеет кнопку Help, используя которую можно получить исчерпывающую информацию о каждом источнике и об установке его параметров.

Блок Asynchronous Machine SI Units.

Назначение:

Моделирует асинхронную электрическую машину в двигательном или генераторном режимах. Режим работы определяется знаком электромагнитного момента машины.

Порты модели A, B и C являются выводами статорной обмотки машины, а порты a, b и c - обмотки ротора машины. Порт Tm предназначен для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из 21 элемента: токов, потоков и напряжений ротора и статора в неподвижной и вращающейся системах координат, электромагнитного момента, скорости вращения вала, а также его углового положения. Для удобства извлечения переменных машины из вектора в библиотеке Sim Power Systems предусмотрен блок Machines Measurement Demux. Модель асинхронной машины включает в себя модель электрической части, представленной моделью пространства состояний четвертого порядка и модель механической части в виде системы второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору. Исходные уравнения электрической части машины записаны для двухфазной (dq-оси) системе координат. Ознакомимся с окном задания параметров рисунок 3.4 и рисунок 3.5.[7 с. 496]

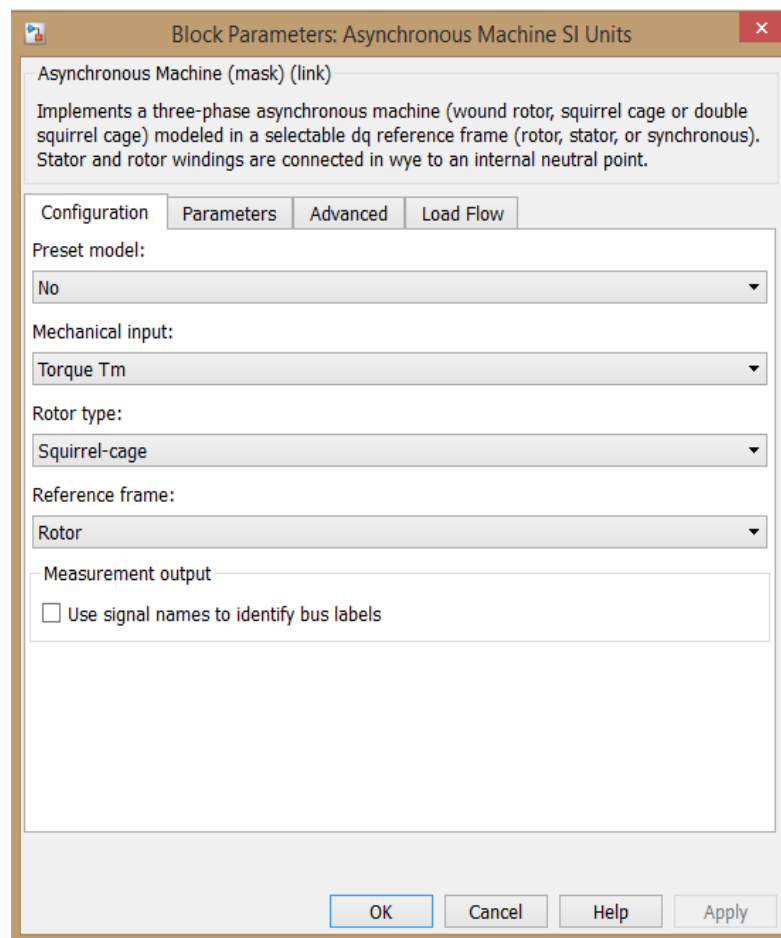


Рисунок 3.4 - Окно задания конфигурации.

Параметры блока:

Rotor type:

[Тип ротора]. Значение параметра выбирается из списка:

- Squirrel-Cage - короткозамкнутый ротор или <беличья клетка> ,
- Wound - фазный ротор.

Reference frame:

[Система координат]. Значение параметра выбирается из списка:

- Rotor - неподвижная относительно ротора,
- Stationary - неподвижная относительно статора,
- Synchronous - вращающаяся вместе с полем.

Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[3.73e+04 460 60]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.09961 0.000867]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[0.05837 0.000867]

Mutual inductance Lm (H):

0.03039

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.4 0.02187 2]

Initial conditions

[1 0 0 0 0 0 0]

☐ Simulate saturation Plot

[i(Arms) ; v(VLL rms)]: 35, 420.4778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.5 – Окно задания параметров.

Nom. Power, L-L volt. And frequency [Pn(VA), Un(V), fn(Hz)]:

[Номинальная мощность Pn (ВА), действующее линейное напряжение Un (В) и номинальная частота fn (Гц)].

Stator [Rs(Ohm) Lls(H)]:

[Сопротивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) статора].

Rotor [Rr(Ohm) Llr'(H)]:

[Сопротивление Rs (Ом) и индуктивность Ls (Гн) ротора].

Mutual inductance $L_m(H)$:
 [Взаимная индуктивность (Гн)].
 Inertia, friction factor and pairs of poles $[J(kg \cdot m^2) F(N \cdot m \cdot s) p]$:
 [Момент инерции J ($кг \cdot м^2$), коэффициент трения F ($Н \cdot м \cdot с$) и число пар полюсов p].
 Initial conditions $[s \text{ th(deg)} i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}(A) \text{ phA, phB, phC(deg)}]$:
 [Начальные условия]. Параметр задается в виде вектора каждый элемент которого имеет следующие значения:

- s – скольжение,
- th – фаза (град.),
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – начальные значения токов статора (А),
- phA, phB, phC – начальные фазы токов статора (град.).

Начальные условия машины могут быть вычислены с помощью блока Powergui.

3.2 Полезные советы при моделировании в Simulink системы MATLAB

Задание параметров модели в виде переменных. Параметры блоков в Simulink можно задавать не только численно, но и в виде переменных.

Иногда требуется исследовать модель с одинаковой структурой, но различными параметрами, например модели одноступенчатых электроприводов с различными двигателями или электроприводы с различными настройками регуляторов будут отличаться только параметрами блоков. В этом случае удобно параметры блоков задать в виде переменных. А значения переменных (для сопротивлений, моментов инерции и т. д.) и функции, по которым они вычисляются (для параметров регулятора), прописать в *m*-файле и назвать его, например Load_Param.m. Данный подход минимизирует вероятность ошибки при настройке параметров и делает их поиск более удобным.

Форматирование графиков в окне блока Scope. Окно блока Scope, отображающее графики сигналов, имеет очень ограниченные возможности по изменению внешнего вида окна и графиков. Фактически можно изменять лишь масштаб отображения графиков, а команды изменения цветов линий и фона окна, толщины линий, размера и типа шрифтов и т. п. недоступны. [7 с. 496]

Также стандартная цветовая палитра осциллографа Scope предусматривает построение цветных графиков на черном фоне. Достаточно часто темный фон окна не устраивает пользователя, поскольку затрудняет непосредственное использование копии окна в печатных документах. К сожалению, в настройках блока отсутствуют средства для изменения его цветовой палитры, толщины линий, размера и типа шрифтов и т. п. Чтобы получить доступ к этим возможностям необходимо после проведения расчетов открыть окно блока Scope и в основном окне MATLAB ввести следующие команды:

```
>> set(0,'ShowHiddenHandles','On')
```

```
>> set(gcf,'menubar','figure')
```

После выполнения этих команд в окне блока Scope появится меню. Используя команды меню Edit/Figure Properties... , Edit/Axes Properties... и Edit/Current Object Properties..., можно изменить внешний вид окна, осей и самих графиков в соответствии со своими требованиями. Изложенное выше относится и к другим блокам, предназначенным для просмотра графиков: Power Spectral Density, Averaging Power Spectral Density, Cross Correlator и т. п.

Также благодаря появившемуся окну имеется возможность сохранять построенные графики в различных форматах изображения. Чтобы каждый раз не набирать данные команды, удобно записать их в m-файл и назвать его, например, Score.m, который будет храниться в той же папке, что и модель. И после проведения расчетов открыть окно блока Scope и вместо набора команд в основном окне MATLAB запустить на выполнение m-файл Score.m.

Нестандартное открытие подсистем. Для повышения удобства работы с моделью команды, которые обычно требуется задавать из основного окна MATLAB, можно оформить в виде m-файлов (или функций) и запускать на выполнение, используя подсистему. Для реализации такой методики необходимо:

1. Создать пустую подсистему.
2. Оформить нужные команды в виде m-файла.
3. В свойствах подсистемы (Edit/Block Properties...) указать имя требуемого m-файла (графа Open function). Окно диалога для установки свойств подсистемы показано на рисунке 3.6

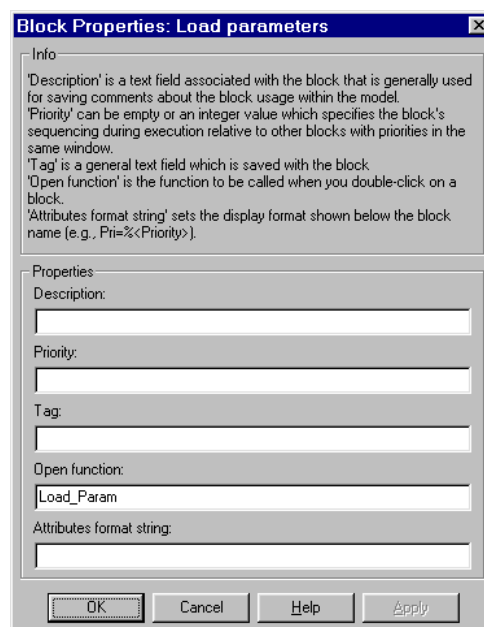


Рисунок 3.6 - Окно диалога для установки свойств подсистемы.

Данная подсистема Load Parameters использована для загрузки параметров модели. При выполнении двойного щелчка левой клавишей мыши на

изображении этой подсистемы происходит выполнение файла Load_Param.m, который находится в той же папке, что и модель. Аналогичным образом можно создать и подсистему для выполнения команд, которые позволяют получить меню в окне блока Scope.[7 с. 496]

4 Моделирование асинхронного короткозамкнутого трехфазного двигателя в собственной системе координат

Раньше асинхронный короткозамкнутый трехфазный двигатель при расчете приводили к двухфазной системе координат, что бы упростить системы уравнений. Но с развитием информационных технологий это стало не нужно, так как появились программы помогающие смоделировать его в собственной системе координат.

Представим математическое описание асинхронного короткозамкнутого двигателя в виде систем уравнений.[13 с. 35 - 40]

Уравнения напряжений для статорной и роторной цепи асинхронного короткозамкнутого двигателя имеют вид:

$$\begin{cases} u_{s1} = i_{s1} \cdot R_{s1} + \frac{d\Psi_{s1}}{dt}, \\ u_{s2} = i_{s2} \cdot R_{s2} + \frac{d\Psi_{s2}}{dt}, \\ u_{s3} = i_{s3} \cdot R_{s3} + \frac{d\Psi_{s3}}{dt}. \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} 0 = i_{r1} \cdot R_{r1} + \frac{d\Psi_{r1}}{dt}, \\ 0 = i_{r2} \cdot R_{r2} + \frac{d\Psi_{r2}}{dt}, \\ 0 = i_{r3} \cdot R_{r3} + \frac{d\Psi_{r3}}{dt}. \end{cases} \quad (4.2)$$

Так как средства приложения Simulink позволяют оперировать векторными величинами, то запишем уравнения в векторной форме, это облегчит вычисления и ускорит работу приложения:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = \mathbf{i}_s \times \mathbf{R}_s + \frac{d\mathbf{\Psi}_s}{dt}, \\ \mathbf{U}_r = \mathbf{i}_r \times \mathbf{R}_r + \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt}. \end{cases} \quad (4.3)$$

где

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ U_{s2} \\ U_{s3} \end{bmatrix}, \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix}, \mathbf{\Psi}_s = \begin{bmatrix} \Psi_{s1} \\ \Psi_{s2} \\ \Psi_{s3} \end{bmatrix}, \mathbf{i}_r = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}, \mathbf{\Psi}_r = \begin{bmatrix} \Psi_{r1} \\ \Psi_{r2} \\ \Psi_{r3} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s3} \end{bmatrix}, \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r3} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

При условии симметричности фаз можно записать:

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = r_s; \quad R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = r_r. \quad (4.6)$$

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Получаем:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = \mathbf{i}_s \times \mathbf{r}_s + \frac{d\Psi_s}{dt}, \\ \mathbf{U}_r = \mathbf{i}_r \times \mathbf{r}_r + \frac{d\Psi_r}{dt}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Потокосцепление обмотки каждой фазы является функцией всех токов статора и ротора.[13 с. 35 – 40]

Обозначим:

$$A_1 = \cos \varphi; \quad A_2 = \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}); \quad A_3 = \cos(\varphi + \frac{4\pi}{3}); \quad (4.9)$$

Системы уравнений для потокосцеплений статора и ротора (соответственно индексы «s» и «r») имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \psi_{s1} = L_s \cdot i_{s1} + L_{s1,2} \cdot i_{s2} + L_{s1,3} \cdot i_{s3} + L_{s1,r1} \cdot A_1 \cdot i_{r1} + L_{s1,r2} \cdot A_2 \cdot i_{r2} + L_{s1,r3} \cdot A_3 \cdot i_{r3}, \\ \psi_{s2} = L_{s2,1} \cdot i_{s1} + L_s \cdot i_{s2} + L_{s2,3} \cdot i_{s3} + L_{s2,r1} \cdot A_3 \cdot i_{r1} + L_{s2,r2} \cdot A_1 \cdot i_{r2} + L_{s2,r3} \cdot A_2 \cdot i_{r3}, \\ \psi_{s3} = L_{s3,1} \cdot i_{s1} + L_{s3,2} \cdot i_{s2} + L_s \cdot i_{s3} + L_{s3,r1} \cdot A_2 \cdot i_{r1} + L_{s3,r2} \cdot A_3 \cdot i_{r2} + L_{s3,r3} \cdot A_1 \cdot i_{r3}. \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} \psi_{r1} = L_r \cdot i_{r1} + L_{r1,2} \cdot i_{r2} + L_{r1,3} \cdot i_{r3} + L_{r1,s1} \cdot A_1 \cdot i_{s1} + L_{r1,s2} \cdot A_3 \cdot i_{s2} + L_{r1,s3} \cdot A_2 \cdot i_{s3}, \\ \psi_{r2} = L_{r2,1} \cdot i_{r1} + L_r \cdot i_{r2} + L_{r2,3} \cdot i_{r3} + L_{r2,s1} \cdot A_2 \cdot i_{s1} + L_{r2,s2} \cdot A_1 \cdot i_{s2} + L_{r2,s3} \cdot A_3 \cdot i_{s3}, \\ \psi_{r3} = L_{r3,1} \cdot i_{r1} + L_{r3,2} \cdot i_{r2} + L_r \cdot i_{r3} + L_{r3,s1} \cdot A_3 \cdot i_{s1} + L_{r3,s2} \cdot A_2 \cdot i_{s2} + L_{r3,s3} \cdot A_1 \cdot i_{s3}. \end{cases} \quad (4.11)$$

Запишем уравнения в векторной форме:

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{ss} &= \begin{bmatrix} L_s & L_{s1,2} & L_{s1,3} \\ L_{s2,1} & L_s & L_{s2,3} \\ L_{s3,1} & L_{s3,2} & L_s \end{bmatrix}, \\ \mathbf{L}_{sr} &= \begin{bmatrix} L_{1,1} \cdot A_1 & L_{1,2} \cdot A_3 & L_{1,3} \cdot A_2 \\ L_{2,1} \cdot A_2 & L_{2,2} \cdot A_1 & L_{2,3} \cdot A_3 \\ L_{3,1} \cdot A_3 & L_{3,2} \cdot A_2 & L_{3,3} \cdot A_1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{L}_{rs} &= \begin{bmatrix} L_{1,1} \cdot A_1 & L_{1,2} \cdot A_3 & L_{1,3} \cdot A_2 \\ L_{2,1} \cdot A_2 & L_{2,2} \cdot A_1 & L_{2,3} \cdot A_3 \\ L_{3,1} \cdot A_3 & L_{3,2} \cdot A_2 & L_{3,3} \cdot A_1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{L}_{rr} &= \begin{bmatrix} L_r & L_{r1,2} & L_{r1,3} \\ L_{r2,1} & L_r & L_{r2,3} \\ L_{r3,1} & L_{r3,2} & L_r \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

При условии симметричности воздушного зазора, синусоидальности МДС и приведения всех величин к обмотке статора, можно записать:

$$\begin{aligned} L_{s1,2} = L_{s1,3} = L_{s2,3} = L_{r1,2} = L_{r1,3} = L_{r2,3} &= \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{L_m}{3}; \\ L_{r1,s2} = L_{r1,s3} = L_{r2,s3} = L_{r1,s1} = L_{r2,s2} = L_{r3,s3} &= \frac{2}{3} \cdot L_m \end{aligned} \quad (4.14)$$

где L_s , L_r - собственные индуктивности статора и ротора соответственно; $\frac{2}{3} \cdot L_m$ - это индуктивность фазы статора от основного магнитного потока и максимальная взаимоиндуктивность разных фаз статора и ротора, имеющая место при совпадении их магнитных осей; L_m - это индуктивность ветви намагничивания однофазной схемы замещения асинхронного двигателя в установившемся режиме; φ - угол поворота ротора при числе полюсов p_n равном 1.[15 с. 173 -175]

Тогда с учётом (4.13) и (4.14) получим общую матрицу взаимных индуктивностей:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{L_m}{3} & -\frac{L_m}{3} & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_1 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_2 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_3 \\ -\frac{L_m}{3} & L_s & -\frac{L_m}{3} & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_3 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_1 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_2 \\ -\frac{L_m}{3} & -\frac{L_m}{3} & L_s & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_2 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_3 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_1 \\ \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_1 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_2 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_3 & L_r & -\frac{L_m}{3} & -\frac{L_m}{3} \\ \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_3 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_1 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_2 & -\frac{L_m}{3} & L_r & -\frac{L_m}{3} \\ \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_2 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_3 & \frac{2}{3} \cdot L_m \cdot A_1 & -\frac{L_m}{3} & -\frac{L_m}{3} & L_r \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Тогда систему уравнений (4.15) можно записать в объединённой форме следующим образом:

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{i} \quad (4.16)$$

где

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Из (4.16) следует, что зная вектор потокосцепления, вектор токов можно определить, решая систему линейных уравнений:

$$\mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1} \cdot \boldsymbol{\Psi} \quad (4.18)$$

Электромагнитная энергия трехфазной машины определяется выражением:

$$W_{\varphi} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Psi} \cdot \mathbf{i} = \frac{1}{2} (\psi_{sA} \cdot i_{sA} + \psi_{sB} \cdot i_{sB} + \psi_{sC} \cdot i_{sC} + \psi_{ra} \cdot i_{ra} + \psi_{rb} \cdot i_{rb} + \psi_{rc} \cdot i_{rc}) \quad (4.19)$$

Момент находим из выражения:

$$M_{\varphi} = p_n \cdot \frac{\partial W}{\partial \varphi} \quad (4.20)$$

$$M_{\varphi} = -\frac{2}{3} \cdot L_m \cdot p_n \cdot \mathbf{i}_r^T \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{i}_s$$

где

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_3 & b_1 & b_2 \\ b_2 & b_3 & b_1 \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} b_1 = \sin \varphi \\ b_2 = \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ b_3 = \sin(\varphi + \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (4.22)$$

Избежать наличия гармонических составляющих в формуле электромагнитного момента можно, заменив вектор тока статора через вектор потока сцепления ротора:

$$M_{\varphi} = \frac{Z_p}{3} \cdot \mathbf{i}_r^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\psi}_r \quad (4.23)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

В развернутом виде формула (4.23) имеет следующий вид:

$$M_{\varphi} = \frac{Z_p}{3} \cdot [i_{ra} \cdot (\psi_{rb} - \psi_{rc}) + i_{rb} \cdot (\psi_{rc} - \psi_{ra}) + i_{rc} \cdot (\psi_{ra} - \psi_{rb})] \quad (4.24)$$

В дополнение к системам уравнений используем основное уравнение динамики электропривода:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \quad (4.25)$$

где J_{Σ} , M , M_c , ω - соответственно суммарный момент инерции, электромагнитный и статический моменты и угловая скорость двигателя.[16 с. 76 – 81]

По уравнениям (4.8, 4.18, 4.24, 4.25) составим модель в Simulink графический лист 1.

Для сравнения переходных процессов возьмём два двигателя на 55 кВт и на 4 кВт.

Программа, разработанная нами в блоке MATLABFunction, для двигателя мощностью 55 кВт, будет иметь вид:

```
function y=matrix(u)
a=u(7);
c1=cos(a); c2=cos(a+2*pi/3); c3=cos(a+4*pi/3);
M=[1.0366 -1/2 -1/2 c1 c2 c3; -1/2 1.0366 -1/2 c3 c1 c2; -1/2 -1/2 1.0366
c2 c3 c1; c1 c3 c2 1.0523 -1/2 -1/2; c2 c1 c3 -1/2 1.0523 -1/2; c3 c2 c1 -
1/2 -1/2 1.0523];
M=2/3*0.0287*M;psi=u(1:6); psi=psi(:);
y=M\psi;
```

Переходные процессы 55 кВт асинхронного двигателя $M(t)$, $\omega(t)$, $i_s(t)$, $i_r(t)$, $U_s(t)$ и угол φ в трёхфазной системе координат представлены на графических листах 2 и 3. Динамические механические характеристики представлены на графическом листе 3.

Программа, разработанная нами в блоке MATLABFunction, для двигателя мощностью 4 кВт, будет иметь вид:

```
function y=matrix(u)
a=u(7);
c1=cos(a); c2=cos(a+2*pi/3); c3=cos(a+4*pi/3);
M=[1.05086 -1/2 -1/2 c1 c2 c3; -1/2 1.05086 -1/2 c3 c1 c2; -1/2 -1/2
1.05086 c2 c3 c1; c1 c3 c2 1.05086 -1/2 -1/2; c2 c1 c3 -1/2 1.05086 -1/2; c3
c2 c1 -1/2 -1/2 1.05086];
M=2/3*0.1722*M;psi=u(1:6); psi=psi(:);
y=M\psi;
```

Переходные процессы 4 кВт асинхронного двигателя $M(t)$, $\omega(t)$,

$i_s(t)$, $i_r(t)$, $U_s(t)$ и угол φ в трёхфазной системе координат представлены на графических листах 2 и 3. Динамические механические характеристики представлены на графическом листе 3.

Как видно на графических листах 2 и 3 переходные процессы асинхронного двигателя сильно отличаются в зависимости от мощности двигателя. У маломощных асинхронных двигателей, электромагнитная индукция и параметры меньше чем у мощных. За счет этого в 4 кВт асинхронном двигателе не такие частые колебания моментов как в 55 кВт двигателе и скорость 4 кВт двигатель набрал быстрее, чем 55 кВт.

По динамическим механическим характеристикам графический лист 3 так же наблюдается малое количество колебаний 4 кВт двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Асинхронные трехфазные двигатели широко используют в народном хозяйстве, например, станки и оборудование, автоматика, телемеханика и т.д.. Также асинхронные двигатели применяются в промышленности, например, для приводов крановых установок общепромышленного назначения, различных грузовых лебедок и других устройств, необходимых в производстве. Электродвигатели переменного тока имеют огромное значение для большинства видов промышленности.

На сегодняшний момент асинхронные электродвигатели прочно вошли в современную промышленность. От их надежности и качества зависит все производство. Не важно, стиральная машина или ткацкий станок, складское оборудование или система вентиляции - работа многих машин невозможна без исправной работы электромотора.

Изучены принципы работы и подключения асинхронных двигателей.

Составлено математическое описание трехфазного асинхронного двигателя на примере обобщенной асинхронной машины. На основе составленного математического описания была исследована работа асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Разработана компьютерная модель асинхронного короткозамкнутого трехфазного двигателя в собственной системе координат, в среде MATLAB Simulink.

В данной выпускной квалификационной работе разработана программа в блоке MATLABFunction, для двигателей мощностью 55кВт и 4 кВт. Получены осциллограммы переходных процессов для данных двигателей, а также их динамические механические характеристики в относительных единицах.

В результате сделан вывод, что моделирование асинхронного двигателя в трехфазной системе координат даёт меньшую погрешность. Этот метод также позволяет исследовать динамику многофазных асинхронных двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Асинхронная машина [Электронный ресурс]. - URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Асинхронная_машина
- 2 Трехфазный асинхронный электродвигатель [Электронный ресурс]. - URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction3ph>
- 3 Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования [текст] : учеб. пособие / А. С. Востриков, Г. А. Французова. - Новосибирск: Изд-во НГУ, 2003. - 364 с.
- 4 Зубков, Н. И. Моделирование электроэнергетических систем в среде MATLAB [текст] : учеб. пособие / Н. И. Зубков, Е. В. Платонова, А. С. Торопов ; Сиб. федер. ун-т, ХТИ - филиал СФУ. - Абакан : РИО ХТИ - филиала СФУ, 2010. - 228 с.
- 5 Ключев, В. И. Теория электропривода [текст] : учебник для студентов вузов / В. И. Ключев. - М. : Энергоатомиздат, 2001. - 698 с.
- 6 Кочетков, В. П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В. П. Кочетков, П. Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. - СПб. : «Нестор», 2004. - С. 230-234.
- 7 Черных, И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений [текст] / Под общ. ред. к. т. н. В. Г. Потемкина. - М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.
- 8 Кочетков, В.П. Исследование динамики асинхронного двигателя / В.П. Кочетков, Н.В. Цугленок, Н.С. Курочкин. - Журнал «Вестник КрасГАУ» №7, Красноярск, 2013. - С. 248-255.
- 9 Кочетков, В.П., Курочкин Н.С. Динамика автоматизированного электропривода с комбинированной оптимальной системой управления. - Журнал «Вестник СибГАУ» Том 17 №2, Красноярск, 2016. - С. 393-402.
- 10 Кочетков, В.П. Основы электромеханики: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В.П. Кочетков [и др.]; под ред. В.П. Кочеткова. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. - 624 с.
- 11 Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Учеб. для студ. вузов. Л.: Энергия, 1980 - 256 с.
- 12 Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, - 94 с.
- 13 Кочетков, В.П. Комбинированные оптимальные системы управления электроприводом // Оригиналы докладов. VI науч.-техн. конф. с международным участием «Элма-90». N 13. ЦИНТИ. - София, 1991. - с. 35 - 40
- 14 Вуль, Ю.Я. Наладка электроприводов экскаваторов [текст] / Ю.Я. Вуль, В.И. Ключев, Л.В. Седаков. 2-е изд., перераб. и доп. - М: Недра, 1975. - 312 с.
- 15 Кочетков, В.П. К вопросу о математической модели электромеханической системы [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов

XVII Межд. науч. конф. - Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004. - С. 173-175.

16 Кочетков, В.П. К вопросу о физико-математическом моделировании динамики экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.А. Колесников, А.В. Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: тр. 3-ей всероссийской научн.-практ. конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2006. - С. 76 - 81.

17 Кочетков, В.П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. - СПб: «Нестор», 2004. - С. 230-234.

18 Кочетков, В.П. Оптимизация систем автоматического управления экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский, Н.С. Дьяченко, И.С. Рублевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI всероссийской научн.-практ. конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2007. - С. 223-227.

19 Кочетков, В.П. Оптимизация управления технологическим процессом открытой добычи полезных ископаемых карьерными экскаваторами [текст]: дис. докт. техн. наук: 05.13.07 / Кочетков Владимир Петрович. - Красноярск, 1996. - 469 с. - Библиогр.:390-422.

20 Кочетков, В.П. Основы электропривода [текст]: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. -2-е изд., испр. - Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ - Филиал СФУ, 2007. - 272 с.

21 Кочетков, В.П. Теория автоматизированного электропривода [текст]: учеб. пособие / В.П. Кочетков, Г.А. Багаутинов. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. - 328 с.

22 Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК [текст]. - СПб.: КОРОНА принт, 2003. - 256 с.

23 Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением [текст] / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 136 с.

24 Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы [текст] / Под общей редакцией А.А. Колесникова - М.: Едиториал УРСС, 2005. - 279 с.

25 Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [текст] : учебник / Г.Г. Соколовский. - Москва : Академия, 2006. - 259 с.

26 Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода [текст] / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С.Сандлер.-М.:Энергия, 1979.- 616 с.

27 Шрейнер, Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами [текст] / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитриенко - Кишинев: ШТИИНЦА, 1982. - 224 с